

第 1 章 检 测 仪 表

各种不同的工业企业在实现自动化时需要检测的工艺参数种类很多。例如,在热工过程中,最常遇到的是温度、压力、流量和物位 4 种参数的检测问题;在化工过程中,除上述四大参数外,还需要进行成分分析和某些物理化学性质如密度、黏度、酸度等的测量;在冶金、钢铁、机械工业中,则又需对某些机械参数如质量、力、加速度、位移、厚度等进行检测;在电厂中还有频率、相位、功率因数等电量需要测定等。显然,要把所有的工艺参数检测方法都讨论是不可能的,下面只对几种比较有普遍性的工艺参数进行示例性的讨论。通过一些典型例子,说明目前采用的主要检测手段和达到的技术水平,介绍组成检测仪表的基本原则和保证可靠工作的一般方法。希望读者在学习了这些有限的例子后,能举一反三,为掌握其他检测仪表打下基础。

1.1 温度检测仪表

温度是工业生产中最基本的工艺参数之一,任何化学反应或物理变化的进程都与温度密切相关,因此温度的测量与控制是生产过程自动化的重要任务之一。

1.1.1 测量温度的主要方法

测量温度的方法虽然很多,但从感受温度的途径来分,有以下两大类:一类是接触式的,即通过测温元件与被测物体的接触而感知物体的温度;另一类是非接触的,即通过接收被测物体发出的辐射热来判断温度。

目前常见的接触式测温仪表有如下几种。

1. 膨胀式温度计

利用固体或液体热胀冷缩的特性测量温度。例如,常见的体温表便是液体膨胀式温度计;利用固体膨胀的,有根据热胀冷缩而使长度变化做成的杆式温度计和利用双金属片受热产生弯曲变形的双金属温度计。

2. 压力式温度计

压力式温度计是根据密封在固定容器内的液体或气体,当温度变化时压力发生变化的特性,将温度的测量转化为压力的测量。它主要由两部分组成:一是温包,由盛液体或气体的感温固定容器构成;二是反映压力变化的弹性元件。

3. 热电偶温度计

根据热电效应,将两种不同的导体接触并构成回路时,若两个接点温度不同,回路中便出现毫伏级的热电动势,该电动势可准确反映温度。

4. 电阻式温度计

利用金属或半导体的电阻随温度变化的特性,将温度的测量转化为对电阻的测量。

非接触式测温仪表是根据物体发出的热辐射测量物体温度。常见的有根据物体在高温时的发光亮度测定温度的光学高温计,以及将热辐射能量聚焦于感温元件上,再根据全频段辐射能的强弱测定温度的全辐射温度计。

非接触测温方法的优点是测量上限不受感温元件耐热程度的限制,因而最高可测温度原则上没有限制。事实上,目前对 1800℃ 以上的高温,辐射温度计是唯一可用的测温仪表。近年来红外线测温技术的发展,使辐射测温方法由可见光向红外线扩展,对 700℃ 以下不发射可见光的物体也能应用,使非接触测温下限向常温扩展,可用于低到 0℃ 左右的温度测量。由于非接触测温仪表不需要与被测物体进行传导热交换,因此不会因测温而改变原来的温度场,而且测温速度快,可对运动物体进行测量。其缺点是对不同物体进行测量时,由于各种物体的辐射能力不同,必须根据物体不同的吸收系数对读数进行修正,一般误差较大。

综观以上各种测温仪表,机械式的大多只能做就地指示,辐射式的精度较差,只有电的测温仪表精度较高,信号又便于远传和处理。因此热电偶与电阻式两种测温仪表得到了最广泛的应用。

1. 1. 2 热电偶

热电偶的原理可用图 1-1 来说明。当两种不同的导体或半导体连接成闭合回路时,若两个接点温度不同,回路中就会出现热电动势,并产生电流。

从物理上看,这一热电动势包括接触电动势和温差电动势两部分,但主要是由接触电动势组成的。当两种不同导体 A、B 接触时,由于两边的自由电子密度不同,在交界面上产生电子的相互扩散。若 A 中自由电子密度大于 B 中的密度,那么在开始接触的瞬间,从 A 向 B 扩散的电子数目将比 B 向 A 扩散的多,使 A 失去较多的电子而带正电荷,相反,B 带负电荷。致使在 A、B 接触处产生电场,以阻碍电子在 B 中的进一步积累,最后达到平衡。平衡时,在 A、B 两导体间的电位差称为接触电动势,其数值决定于两种材料的种类和接触点的温度。

图 1-1 表示的热电偶回路中,在温度不同的两个接点上,分别存在两个数值不同的接触电动势 $e_{AB}(T)$ 及 $e_{AB}(T_0)$,回路中的总电动势为

$$E(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (1-1)$$

式中, e 的下标表示电动势的方向, e_{AB} 表示由 A 到 B 的电动势。

对一定的热电偶材料,若将一端温度 T_0 维持恒定(这个接点称为自由端或冷端),而将另一端插在需要测温的地方,则热电动势 E 为测温端温度 T (这个接点又称为工作端或热端)的单值函数,用电表或仪器测定此热电动势的数值,便可确定被测温度 T 。

在实际使用热电偶测温时,总要在热电偶回路中插入测量仪表和使用各种导线进行连接,也就是说总要在热电偶回路中插入其他种类的导体。下面研究插入另一种导体是否影响热电动势 E 的数值。在图 1-2 中,除热电偶两种材料 A、B 外,又插入第三种导体 C 组成闭合回路,设 A、B 的接触点温度为 T , A、C 和 B、C 两处接触点的温度为 T_0 ,则回路中总电动势为

$$E = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (1-2)$$

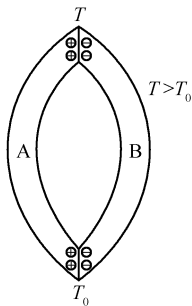


图 1-1 热电偶的原理

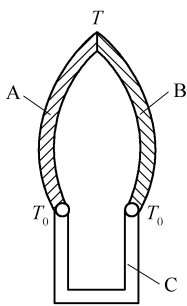


图 1-2 热电偶回路中插入第三种导体的情形

若各接点温度都相同,即 $T=T_0$,则由热力学第二定律可推断,此时总电动势 E 必为零。因为此时如果有电动势 E 存在,必有电流流动,使回路中某一部分加热。在没有外界做功的条件下,这种热量自动由温度低处流向高处的现象是不可能发生的。

因此可写出

$$e_{AB}(T_0)+e_{BC}(T_0)+e_{CA}(T_0)=0 \quad (1-3)$$

所以

$$e_{BC}(T_0)+e_{CA}(T_0)=-e_{AB}(T_0) \quad (1-4)$$

代入式(1-2)得

$$E=e_{AB}(T)-e_{AB}(T_0)$$

这仍然是式(1-1)的结果。由此可知,只要接入第三种导体的两个连接点温度相等,它的接入对回路电动势毫无影响。这一结论在使用上有着重要的意义。据此,我们可放心地在温度相同的电路中插入各种仪表和导线进行测量。

下面讨论热电偶的材料。原则上说,随便两种不同的导体焊在一起,都会出现热电动势。这并不是说所有热电偶都具有实用价值,能被大量采用的材料必须在测温范围内具有稳定的化学及物理性质,热电动势要大,且与温度接近线性关系。

为统一各国生产的热电偶种类及其特性,以便互换和替代,国际电工委员会(IEC)于 1977 年制定了热电偶的国际标准,规定了标准的热电动势—温度特性分度表。此前,我国长期按前苏联的国家标准生产热电偶,IEC 标准推出后,我国决定按国际标准生产,并制定了相应的我国国家标准,从 1986 年起,在生产和使用中全面贯彻新的国家标准。表 1-1 列出了几种常用的我国标准型热电偶的材料、分度号及主要特性。

表 1-1 几种常用的我国标准型热电偶的材料、分度号及主要特性

热电偶名称	分度号	热电偶丝材料	测温范围/℃	平均灵敏度	特 点	补 偿 导 线
铂铑 30—铂铑 6	B	正极铂 70%,铑 30% 负极铂 94%,铑 6%	0~1800	$10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	价格贵,稳定,精度高,可在氧化性气氛使用	冷端在 0~100℃ 间可不用补偿导线
铂铑 10—铂	S	正极铂 90%,铑 10% 负极铂 100%	0~1600	$10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	同上。热电特性的线性度比 B 好	铜—铜镍合金
镍铬—镍硅	K	正极镍 89%,铬 10% 负极镍 94%,硅 3%	0~1300	$40\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	线性好,价廉,可在氧化及中性气氛中使用	铜—康铜
镍铬—康铜	E	正极同上,负极康铜 (铜 60%,镍 40%)	-200~900	$80\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	灵敏度高,价廉,可在氧化及弱还原气氛使用	
铜—康铜	T	正极铜,负极康铜 (铜 60%,镍 40%)	-200~400	$50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	最便宜,但铜易氧化,常用于 150℃ 以下温度测量	

表 1-1 中,铂及其合金属于贵金属,其组成的热电偶价格很贵。它的优点是热电动势非常稳定,故主要用作标准热电偶及测量 1100℃ 以上的高温。在普通金属热电偶中,镍铬—镍硅的电动势温度关系线性度最好,镍铬—康铜的灵敏度最高,铜—康铜的价格最便宜。除表中所列出的常用热电偶外,我国还能生产许多新型热电偶,如可用来测量 2800℃ 的钨铼超高温热电偶,以及测 -270℃ 的金铁—镍铬低温热电偶等。

热电偶测温的误差,在低温段为 1~2.5℃,高温段相对误差为 0.25%~1%。例如,Ⅰ级铂铑10—铂热电偶在 0~1100℃ 间的允许误差为 ±1℃,温度高于 1100℃ 时约为 ±0.4%T(℃)。使用热电偶时必须十分注意其适用条件,在有害的气氛环境下,热电特性会急剧变化,产生很大的测量误差。图 1-3 给出了几种常用的热电偶特性。

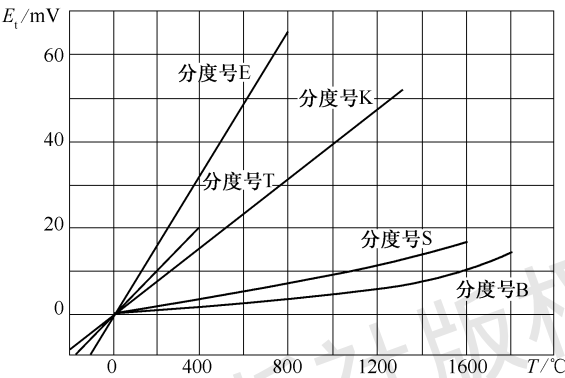


图 1-3 几种常用热电偶的特性(冷端温度为 0℃)

为了延长热电偶的使用寿命,常在热电偶丝外面套上金属或石英、陶瓷等制成的保护套管,以隔离有害气体和物质对热电偶的损害。但加套管后,热电偶测温的滞后性加大。根据结构的不同,一般热电偶的时间常数为 1.5~4 分钟。特殊结构的小惯性热电偶的时间常数约为几秒,快速薄膜热电偶的时间常数则为毫秒级。

热电偶的热电动势大小不仅与测量端温度有关,还决定于自由端(冷端)的温度。所以,使用热电偶时常需保持冷端温度恒定,例如将冷端置于冰瓶内,由冰水混合物保证 0℃ 的稳定温度。在工业测量仪表中,通常在电路中引入一个随冷端温度变化的附加电动势,自动补偿冷端温度的变化,以保证测量精度。考虑到冷端恒温器或电动势补偿装置通常离测量点较远,在使用较贵的热电偶时,如果全用热偶丝从测量点引至恒温器,代价将太高。为了节约,工业上选用在较低温度下(100℃ 以下)与所用热电偶的热—电特性相近的廉价金属,作为热偶丝在低温区的替代品,称为补偿导线,其接法如图 1-4 所示。这样,热偶丝只要引至温度 100℃ 以下的地方,其余的长度可用廉价的补偿导线来延伸。例如,贵金属铂铑—铂热电偶,可用铜(正极)和铜镍合金(负极)作补偿导线,将冷端延伸到离测点较远的地方。工业上,各种补偿导线有规定的显著颜色可供辨认,使用时要注意正负极性不能接错。

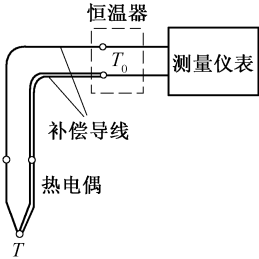


图 1-4 补偿导线的使用

1. 1. 3 热电阻

测量低于 150℃ 的温度时,由于热电偶的电动势较小,常使用金属电阻感温元件(简称热

电阻)测量温度。热电阻不像热电偶那样需要冷端温度补偿,测量精度也比较高,在 $-200\sim+500^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,获得极为广泛的应用。

热电阻测温仪表是根据金属导体的电阻随温度变化的特性进行测温的。例如,铜的电阻温度系数为 $4.28\times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$,当温度由 0°C 上升到 100°C 时,铜电阻的阻值约增大42.8%。因此对确定的电阻,只要精确地测定其阻值的变化,便可知道温度的高低。

适合作电阻感温元件的材料应满足如下要求:电阻温度系数大,电阻与温度的关系线性度较好,在测温范围内物理化学性能稳定。目前用得最多的是铂和铜两种材料,其特性如图 1-5 所示。在低温及超低温测量中则使用钢电阻、锰电阻及碳电阻等。

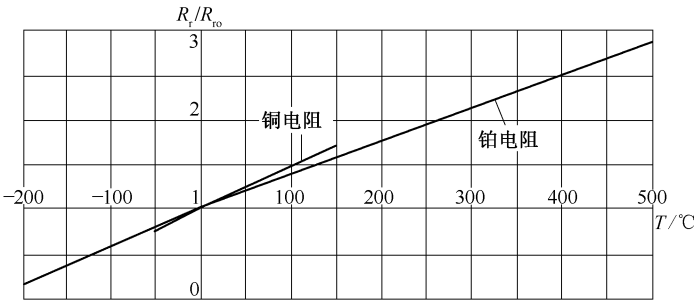


图 1-5 铂电阻及铜电阻的特性

铂电阻的特点是精度高,性能稳定可靠,被国际组织规定为 $-259\sim+630^{\circ}\text{C}$ 间的基准器,在工业上则广泛用于 $-200\sim+500^{\circ}\text{C}$ 间的温度测量。铂电阻的缺点是其电阻与温度的关系不太线性,在 $0\sim850^{\circ}\text{C}$ 之间,其阻值与温度关系可表示为

$$R_T=R_0(1+AT+BT^2)$$

式中, R_T , R_0 分别为 $T(^{\circ}\text{C})$ 及 $0(^{\circ}\text{C})$ 时的电阻值; A , B 为常数, $A=3.908\times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, $B=-5.802\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$ 。

铜电阻的优点是价格便宜,电阻与温度关系的线性度较好;但温度稍高便容易氧化,多用于 $-50\sim+100^{\circ}\text{C}$ 间的温度测量。

电阻感温元件根据用途不同,做成各种形状和尺寸,其基本结构都是把很细的电阻缠绕在棒形或平板形的骨架上,骨架由陶瓷或云母等制成。温度变化时,电阻丝在骨架上要求不受应力的影响,以保持特性的稳定。在电阻丝外面一般都有保护层或保护套管。为了减小测温的时间滞后,电阻体要导热良好,并尽量减小热容量。目前国产的电阻感温元件,热惯性大的,时间常数为 4 分钟左右,热惯性小的约为几秒。

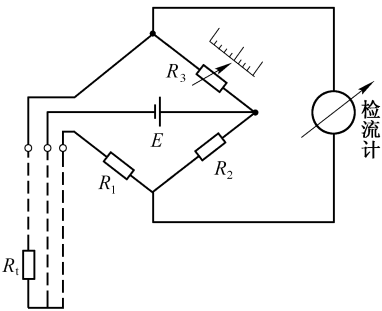


图 1-6 三线热电阻在测量电桥中的接法

置于电桥的两臂内,它们随环境温度变化对电桥的影响可以大致抵消。

在使用热电阻测温时,有一个需要注意的问题,就是电阻体外部的导线电阻是与热电阻串联的,如果导线电阻不确定,测温是无法进行的。因此,不管热电阻和测量仪表之间的距离远近,要使导线电阻符合规定的数值。尽管这样,考虑到导线所处的环境温度变化时,导线电阻仍会变化,使测温产生误差。为此,常使用三根引出线的热电阻,如图 1-6 所示。这样,在使用平衡电桥对热电阻 R_t 进行测量时,由电阻体引出的三根导线,一根的电阻与电源 E 串联,不影响桥路的平衡,另外两根的电阻被分别

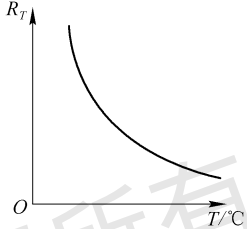
1.1.4 半导体热敏电阻

半导体热敏电阻由于感温的灵敏度特别高,在一些精度要求不高的测量和控制装置中得到一定的应用。我们知道,大多数金属材料,当温度每变化 1°C 时,阻值变化 $0.4\%\sim 0.6\%$,但热敏电阻可达 $2\%\sim 6\%$,即其灵敏度比金属电阻高一个数量级。因此使用热敏电阻时,其测量和放大线路十分简单。

热敏电阻元件一般是由镍、钴、锰、铜、铁、铝等多种氧化物按一定的比例混合后,经研磨、成型、烧结成坚固致密的整体,再焊上引线制成的;可做成珠状、杆状、片状等各种形状,尺寸可做得很小,例如,可做成直径只有十分之几毫米的小珠粒,因而热惯性极小,可测量微小物体或某一局部点上的温度。

半导体热敏电阻与金属电阻不同,它的电阻温度系数是负的。在温度升高时,由于半导体材料内部的载流子密度增加,故电阻下降,其电阻温度关系如图 1-7 所示。可以看到,这是一个非线性关系,可大致表示为如下的对数函数

$$R_T = R_{T_0} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$



式中, R_T 与 R_{T_0} 分别表示 $T(\text{K})$ 与 $T_0(\text{K})$ 时的电阻值; B 为常数,与材料成分及制造方法有关。

图 1-7 热敏电阻的特性

半导体热敏电阻的电阻温度系数不是常数,约与温度平方 $T^2(\text{K})$ 成反比。

由于热敏电阻的特性曲线不太一致,互换性差,使其在精确测量中的应用受到一定的限制。

目前热敏电阻的使用温度为 $-50\sim +300^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.5 热电偶温度变送器的基本结构

在单元组合式仪表中,热电偶、热电阻等敏感元件输出的信号,需经一定的变换装置转变为标准信号。如在电动单元组合仪表中应变换为 $4\sim 20\text{mA}$ 直流电流信号,以便与调节器等配合工作。这种信号变换装置称为变送单元或变送器。

在电动温度变送器中,根据所用的敏感元件(热电偶或热电阻)及测量参数(测量某点温度或两点间的温差)的不同有几种品种。不过,它们的基本结构是相同的,如图 1-8 所示,其核心都是一个直流低电平电压(mV)—电流(mA)变换器,大体上都可分为输入电路、放大电路及反馈电路三部分。下面以 DDZ—Ⅲ型电动单元组合仪表的热电偶温度变送器为例,对各部分的工作原理进行具体的介绍。

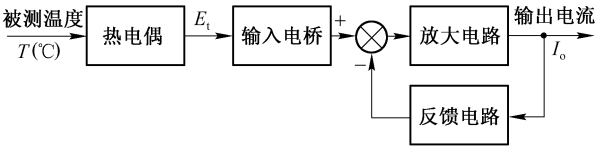


图 1-8 温度变送器的方块图

1. 输入电路

热电偶温度变送器的输入电路主要起热电偶的冷端温度补偿与零点调整的作用,如图 1-9

所示。由于它形式上是一个电桥,常称为输入电桥。

图 1-9 桥路的左半边是产生冷端温度补偿电动势的。由铜丝绕制的电阻 R_{Cu} 安装在热电偶的冷端接点处,当冷端温度变化时,利用铜丝电阻随温度变化的特性,向热电偶补充一个由冷端温度决定的电动势作为补偿。桥路左臂由稳压电源 V_Z (约 5V) 和高电阻 R_1 (约 10k Ω) 建立的恒值电流 I_2 流过铜电阻 R_{Cu} ,在 R_{Cu} 上产生一个电压,此电压与热电动势 E_t 串联相加。

当冷端温度升高时,热电动势 E_t 下降,但由于 R_{Cu} 增值,在 R_{Cu} 两端的电压增加。只要铜电阻的大小选择适当,便可得到满意的补偿。例如,对铂铑—铂热电偶,其冷端温度在 0~100℃ 间变化的平均热电动势为 6 μ V/℃,已知铜的电阻温度系数 $\alpha=0.004/^\circ\text{C}$,故全补偿的条件可写为

$$I_2(\text{mA}) \times R_{Cu}(\Omega) \times 0.004/(^\circ\text{C}) = 6(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

若 $I_2=0.5\text{mA}$,则求得 $R_{Cu}=3\Omega$ 。

当然,严格地说,热电动势的温度特性是非线性的,而铜电阻的特性却接近线性,两者不可能取得完全的补偿。但实际使用中,由于冷端温度变化范围不大,这样的补偿已经可以满足。

图 1-9 桥路的右半边是零点调整(亦称零点迁移)电路。由另一高电阻 R_2 确定的恒值电流 I_1 流过可变电阻 R_4 ,在它上面建立的电压与热电动势 E_t 及冷端温度补偿电动势串联。这不仅可以抵消铜电阻上的起始压降,且可自由地改变桥路输出的零点。调整输出零点的必要性对采用活零点的 DDZ—Ⅲ型仪表来说是很容易理解的,因为在 DDZ—Ⅲ型仪表中,标准信号是 4~20mA,即以满幅度输出的 20%代表信号的零值。因此在温度变送器中,当热电动势为零时,应由输入桥路提供满幅度电压的 20%,建立输出的起点。

较大幅度的调整零点,即所谓进行零点迁移,不管对 DDZ—Ⅲ还是其他系列的变送器都是需要的。有些生产装置的参数变化范围很窄,例如,某点的温度总在 500~1000℃ 间变化,因此希望对 500℃ 以下的温度区域不予指示,而给工作区域以较高的检测灵敏度。此时可通过零点迁移装置,配合灵敏度调节,实现量程压缩。为了说明方便,下面举一个以 0~10mA 电流为标准信号的变送器例子,如图 1-10 所示。图 1-10(a)为零点不迁移的情况。图 1-10(b)为通过零点迁移装置,给热电动势反向加上一个相当于 500℃ 的附加电动势,这样,只有当温度超过 500℃ 时,变送器才有输出;由于灵敏度未变,输入/输出特性只是向右平移,其输出电流 0~10mA 所对应的温度范围仍为 1000℃。图 1-10(c)的情况是在零点迁移 500℃ 以后,又把灵敏度提高一倍,这样,变送器不仅反映的起始温度变了,而且量程范围也变成 500~1000℃,在这个温度范围内变送器可得到较高的灵敏度。

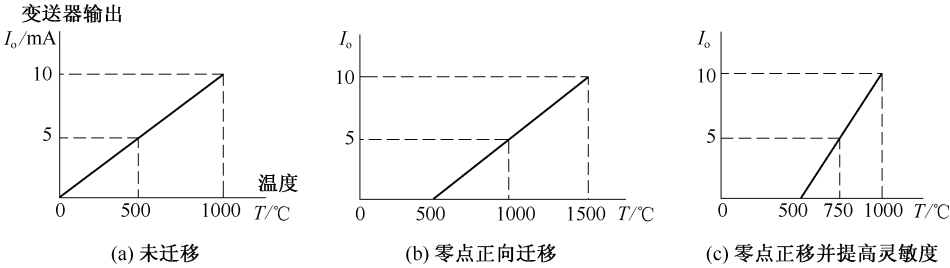


图 1-10 温度变送器的零点迁移

2. 放大电路

由于热电偶的电动势数值很小,一般只有十几毫伏或几十毫伏,因此将它变换为高电平输出必须经过多级放大。考虑到热电动势是直流信号,变送器中的放大器必须是高增益和低漂移的直流放大器。其电压增益一般约需 $10^4 \sim 10^5$ 倍,零点漂移必须小于几微伏或几十微伏。变送器的量程愈小,对自身的零点漂移要求愈严格。例如,对一个满量程为 3mV 的温差变送器,如果自身的零点漂移超过 $10\mu\text{V}$,那么仅这一项误差就超过 0.3% ,再考虑其他因素,这样的变送器就很难达到 0.5 级的精度。

除了对增益和零点漂移的要求以外,温度变送器中的放大器还必须具有较强的抗干扰能力,特别是抗共模干扰的能力。因为测量元件和传输线上经常会受到各种电磁干扰,例如,用热电偶测量电炉温度时,热偶丝可能与电热丝靠得很近;在 800°C 以上的高温下,耐火砖及热电偶瓷套管的绝缘电阻会降得很低。这样,电热丝上的工频交流电便会向热电偶泄漏,使热电偶上出现几伏或几十伏的对地干扰电压,这种在两根信号线上共同存在的对地干扰电压称为共模干扰或纵向干扰。除了这种干扰形式外,在两根信号线之间更经常地存在电磁感应、静电耦合以及电阻泄漏引起的差模干扰。由于这种干扰表现为两根信号线之间的电压差,所以也称为线间干扰或横向干扰。

关于差模干扰,由于在一般实验室仪器及电子线路的调试中都会碰到,人们对它是比较熟悉和重视的。它常常导致放大器饱和、灵敏度下降、零点偏移,甚至使放大器不能正常工作。但在温度变送器中,考虑到热电偶信号的变化很慢,可以从频率上把测量信号与干扰区别开来,或者在变送器的输入端用滤波器等加以抑制。

对控制仪表来说,具有特殊性的是,它常受到幅度很大的共模干扰的作用,这一点往往被人们所忽视。其实共模干扰在一定的条件下很容易转化为差模干扰,同样会影响仪表的正常工作。例如,图 1-11(a)中,作用在热电偶上的共模干扰 e_{cm} 经两根传输线送到变送器输入端时,由于线路阻抗 Z_1 、 Z_2 与变送器输入阻抗 Z_3 、 Z_4 的分压作用,将在 A、B 两点间形成如下的差模干扰电压:

$$e_{\text{AB}} = e_{\text{cm}} \left(\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} - \frac{Z_4}{Z_2 + Z_4} \right)$$

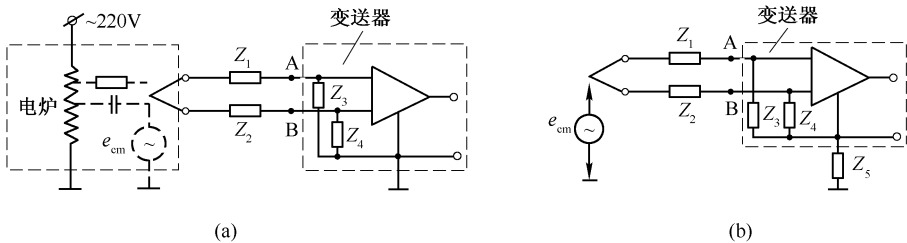


图 1-11 变送器受到的共模干扰

由此可知,要使共模干扰不转化为差模干扰,必须使阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 组成的电桥平衡,即必须满足 $Z_1 : Z_3 = Z_2 : Z_4$ 。这样的条件并不容易实现,因为这些阻抗值都是随使用条件变化的参数,例如,线路阻抗 Z_1 、 Z_2 除随传输线长短变化外,由于包含冷端温度补偿电路和零点迁移电路等,常随使用状况而变化。再考虑到共模干扰的频谱很宽(从直流到极高的高频),上述的桥路平衡条件不可能在所有的频率上完全满足。

抑制共模干扰的一个有效办法是把仪表浮空,也就是把变送器内的零线和大地绝缘。采取这种措施后的仪表等效电路如图 1-11(b)所示。图中 Z_5 表示变送器零线与大地之间的绝缘阻抗。显然,如果 $Z_5 \rightarrow \infty$,那么共模干扰电压 e_{cm} 在阻抗 Z_3 、 Z_4 上的分压都趋于零,两者之间的压差 U_{AB} 必为零,可以有效地抑制共模干扰向差模干扰的转化。图 1-12 所示的方框图就是按这种思想设计的一种变送器方案。考虑到作为变送器负载的调节器、记录仪等常需要接地,图中变送器用隔离变压器分为互相绝缘的前后两部分,其中输入及放大电路部分与检测元件相连,但对地浮空;另一部分检波输出电路与负载相连,可根据需要接地或不接地。工作时,热电动势直流信号先经放大电路放大,然后由变流器变换成交流方波,经输出变压器 T_o 以磁通耦合方式传递给检波输出电路。同样,电源和输出电流反馈也分别通过变压器 T_s 和 T_f 送给放大电路。这样,只要这些隔离变压器的绝缘电阻足够大,同时使通过变压器的信号调制频率足够高,那么,变压器绕组之间以及绕组对地的分布电容就可以做得比较小(在 DDZ—Ⅲ型温度变送器中电源和信号调制频率都在 $10 \sim 20\text{kHz}$ 左右),因而对直流或 50Hz 干扰来说,可以认为浮空是相当彻底的,能有效地抑制这一频段的共模干扰向差模干扰的转化。

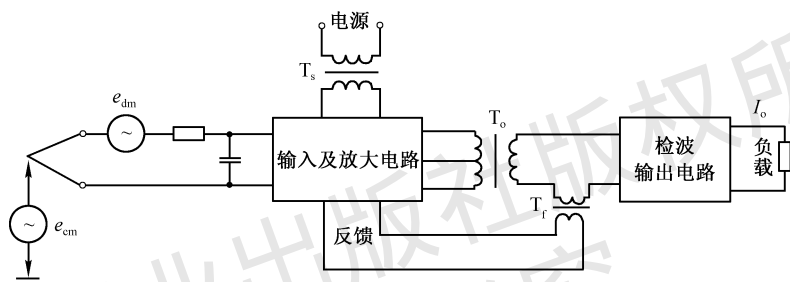


图 1-12 变送器的抗干扰措施

3. 反馈电路

为了克服放大电路的非线性及增益、负载变化等引起的误差,温度变送器都采用闭环方式构成。这时只要保持输入及反馈环节的参数稳定,在放大电路增益足够高时,其闭环传递函数可保证十分稳定。图 1-12 中,为了抑制输出变压器 T_o 的磁路非线性及输出负载变化引起的误差,反馈电压取自输出变压器 T_o 的副边,并用电流互感器 T_f 直接反馈负载电流的大小作为反馈信号。

考虑到大多数热电偶的特性是非线性的,例如,铂铑—铂热电偶在 $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ 间电动势与温度关系的非线性约为 6% ,如果变送器的输入电路和反馈电路都是线性的,变送器的输出将随输入的毫伏信号作线性变化,它与温度的关系却是非线性的。目前工业上使用的大多数温度变送器就是这样的。但在 DDZ—Ⅲ型仪表的温度变送器中,为了使输出大小能直接与被测温度成线性关系,以便指示及控制,在变送器的输入或反馈电路中加入线性化电路,对测量元件的非线性给予修正。对热电偶温度变送器来说,因为输入热电动势太小,不宜在输入电路中修正,都在反馈电路中采取措施,使用非线性反馈电路,如图 1-13 所示。当温度较高,热电偶灵敏度偏高的区域,使负反馈作用强一些,这样以反馈电路的非线性补偿热电偶的非线性,可以获得输出电流 I_o 与温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 的线性关系。当然这种具有线性化机构的变送器在进行量程变换时,其反馈的非线性特性必须作相应的调整。

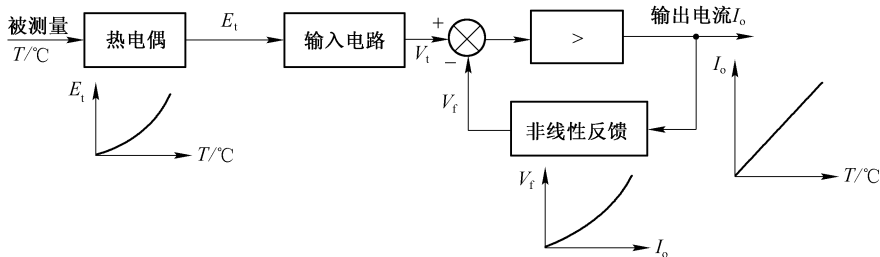


图 1-13 温度变送器的线性化方法

1.1.6 DDZ—Ⅲ型热电偶温度变送器的实际线路

因为温度变送器是最常用的工业自动化仪表之一,下面讨论一个实际的例子。图1-14是DDZ—Ⅲ型仪表的一种热电偶温度变送器的简化线路图。其基本结构就是按图 1-12 的原则安排的。

图 1-14 中,热电动势 E_t 与铜电阻 R_{Cu} 上的冷端温度补偿电动势相加后,送至运算放大器 IC_2 的同相输入端。 IC_2 的反相输入端则接受电位器 RP_1 上的零点迁移电压及反馈电压 V_f ,这两个电压在量程电位器 RP_1 上叠加,改变 RP_2 触点的位置可以改变反馈电压的分压比,即改变反馈强度,因而改变整个变送器的量程。不过在这个电路中,当改变 RP_2 触点位置时,也同时改变着零点迁移电压的分压比。因此在改变量程时,零点会被牵连变化,使用时必须注意到这一特点。

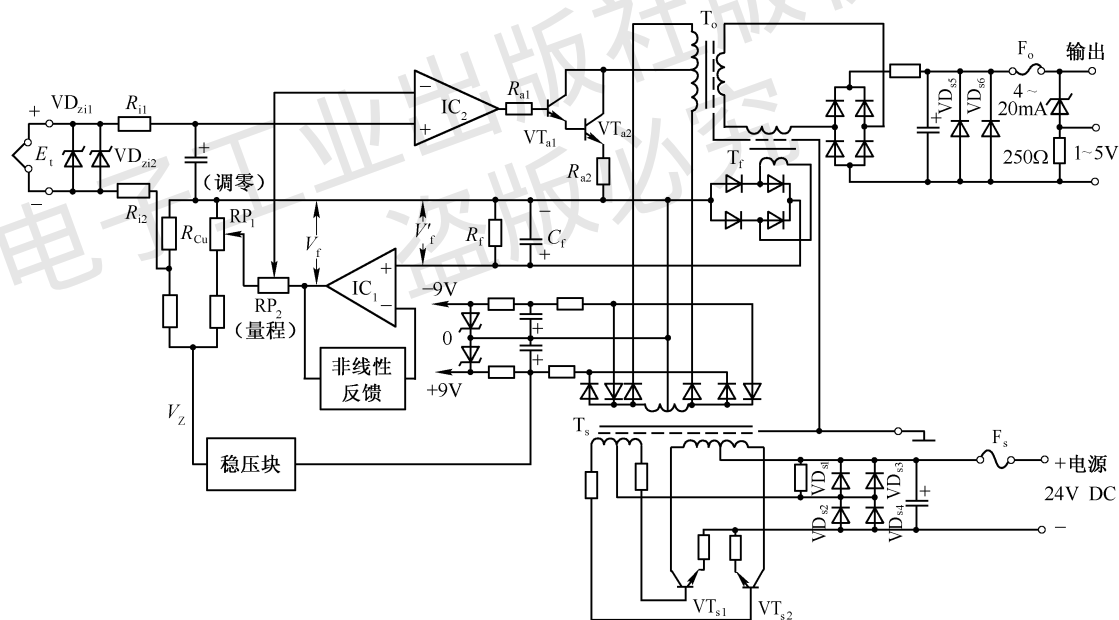


图 1-14 DDZ—Ⅲ型热电偶温度变送器的简化线路图

放大器 IC_2 是一个低漂移高增益运算放大器,它根据加在同相端和反相端两个输入电压之差工作。为了方便,将这部分电路单独画出如图 1-15 所示。当热电动势 E_t 增大时, IC_2 输出正电压,经复合管 VT_{a1} 、 VT_{a2} 构成的电压-电流转换器,转化为恒流输出 I_1 。这个电流在方波电源的作用下,交替地通过输出变压器 T_o 的两个原边绕组,在副边绕组中感应出与 I_1 大小成正比的交变电流。此电流经整流滤波,即为变送器的直流输出电流 I_o 。

这里使用复合管 VT_{a1} 、 VT_{a2} 的目的是提高功率放大级的输入阻抗,减少运算放大器 IC_2

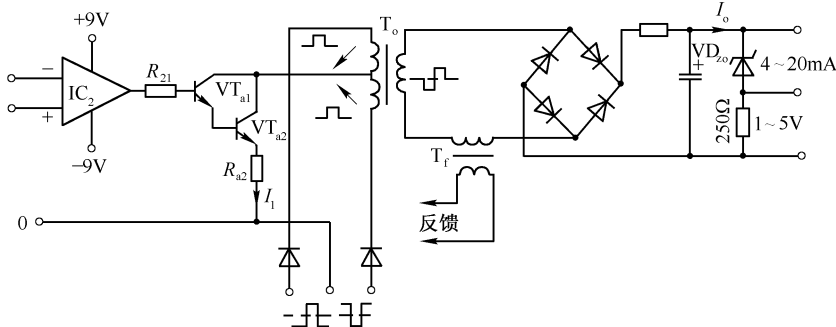


图 1-15 变送器的功率放大及输出电路

的功耗,从而降低其温度漂移。输出端稳压管 VD_{zo} 的作用在于,当电流输出回路断线时,输出电流 I_o 仍可通过稳压管形成回路,保证电压输出信号不受影响。

图 1-14 变送器的反馈回路是由电流互感器 T_f 、整流滤波电路,以及由运算放大器 IC_1 构成的非线性函数电路组成的。由于输出变压器 T_o 的副边电流是正负对称的交变电流,串入一个电流互感器 T_f 便可以实现隔离反馈。 T_f 的副边电流经检波滤波,在 R_f 、 C_f 上可得到与输出电流 I_o 成正比的直流反馈电压 V_f' ,该电压经运算放大器 IC_1 和多段二极管折线逼近电路组成的非线性变换电路转换为电压 V_f 后,反馈到运算放大器 IC_2 的反相输入端,实现对热电偶特性的线性化修正。关于非线性变换电路的具体结构,此处不再详述。

图 1-14 变送器的电源是由 +24V 直流电源供给的。为了提高变送器的抗共模干扰能力和有利于安全防爆,放大器需要在电路上与电源隔离。为此, +24V 直流电源不直接与放大电路相连,需经直流-交流-直流变换,即先用振荡器把直流电源变为交流,然后通过变压器 T_s ,以交变磁通将能量传递给副边绕组。最后,将副边绕组上的交流电压整流、滤波、稳压,获得 $\pm 9V$ 的直流电压供给运算放大器。

最后,讨论一下这个变送器采取的安全防爆措施。我们知道,很多化工及石油生产场所,常存在易燃易爆的气体或介质。在使用电动仪表时,如果不采取措施,在电路接通、断开或事故状态时,难免发生火花,引起爆炸或火灾。因此,用于这些易燃易爆场所的电动仪表,必须在结构上或电路上采取安全措施,例如,在 DDZ—I 型和 DDZ—II 型电动单元组合仪表中常在结构上采取隔爆措施,使仪表内可能产生的火花和外界的易燃易爆气体相隔离,以实现防爆。在 DDZ—III 型仪表中,采取的是安全火花防爆措施。它把仪表分为控制室和现场安装两类,将强电部分安装于离危险场所较远的控制室中,而对安装在危险场所的检测仪表及执行器,一方面在线路设计上对其自身能量进行限制,另一方面使用专门的安全保护电路;严格防止外界非安全能量的窜入,从而保证那些电路在任何事故状况下,只可能发生“安全”的火花,即这些火花能量很小,决不会导致燃烧或爆炸。这种安全火花的概念是从实践中总结出来的。大量的实践表明,即使在易燃易爆气体中,也不是任何火花都会引起燃烧和爆炸的。只有在火花能量足以在某一点引起强烈的化学反应,形成燃烧并产生连锁反应时,才会形成爆炸事故。例如,对最易爆炸的氢、乙炔、水煤气等气体,实验证明,在 30V 的电压下,对纯电阻性电路,电流只要小于 70mA,便不会发生爆炸。

图 1-14 所示的 DDZ—III 型温度变送器是控制室安装仪表,属于安全火花型防爆仪表,在线路上采取了如下安全防爆措施:

① 在热电偶输入端设稳压二极管 VD_{z1} 、 VD_{z2} 及限流电阻 R_{i1} 、 R_{i2} ,以防止仪表的高能量传递到生产现场。

② 变送器的输入端与输出端及电源回路之间通过输出变压器 T_o 、电源变压器 T_s 及反馈变压器 T_f 在电路上进行隔离。为了防止电源线或输出线上的高电压通过上述变压器原副边绕组之间短路而窜入输入端,在各变压器的原副边绕组间都设有接地的隔离层。此外,在输出端及电源端还装有大功率二极管 $VD_{s1} \sim VD_{s6}$ 及熔断器 F_o 、 F_s ,当过高的正向电压或交流电压加到变送器输出端或电源两端时,将在二极管电路中产生大电流,把熔断器烧毁,切断电源,使危险的电压不能加到变送器上。由于这些二极管的功率较大,在熔断器烧毁过程中不会先被损坏。

DDZ—Ⅲ型温度变送器除上面讨论的热电偶温度变送器外,还有热电阻和直流毫伏变送器两个品种。它们的放大电路是完全相同的,只是输入和反馈部分略有不同,这里不作详述。

1.2 压力检测仪表

压力也是工业生产中的重要工艺参数,例如,在化工生产上,压力往往决定化学反应的方向和速率。此外,压力测量的意义还不局限于它自身,有些物理量,如温度、流量、液位等往往通过压力来间接测量。所以压力的测量在自动化中具有特殊的地位。

在具体讨论压力测量方法之前,需要对“压力”这个名词先说明一下。物理上把单位面积上所受的作用力叫做压强,而把某一面积所受力的总和,称为压力。而我国工程上习惯把“压力”理解为单位面积上所受的作用力,显然这和物理学的名词是混淆的。由于工程上这种叫法使用已久,下面只好按这一习惯的名词进行讨论。

生产上,压力的测量常遇到如下三种情况:

① 测量某一点压力与大气压力之差,当这点压力高于大气压力时,此差值称为表压,这种压力计的读数为零时,该点压力即为大气压力;当该点压力低于大气压时,此差值称为负压或真空度;

② 测定某一点的绝对压力;

③ 测量两点间的压力差,这种测量仪表称为差压计。

工程上,过去常用千克/厘米² 作为压力单位,称为工程大气压(at),此外,有些场合还使用毫米汞柱(mmHg)、毫米水柱(mmH₂O)、磅/英寸² (1b/in²)、巴(bar)、标准大气压(atm)等。1984年,我国政府决定废除这些单位,规定从1991年起,一律使用以国际单位制(SI)为基础的中国法定计量单位。

在我国法定单位制和国际单位制中,压力单位采用牛顿/米²,称为“帕斯卡”,简称“帕”(Pa)。它与过去使用的千克/厘米² 之间的换算关系为

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \frac{\text{千克}}{\text{厘米}^2} = \frac{1 \text{ kg} \times 9.80665 \text{ m/s}^2}{10^{-4} \text{ m}^2} = 98066.5 \frac{\text{牛顿}}{\text{米}^2} = 98066.5 \text{ Pa}$$

由于 Pa 的单位很小,所以最常用的压力单位是 MPa(兆帕)和 kPa(千帕)。

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10.19716 \text{ 工程大气压}$$

由于工业上需要测量的压力范围很宽,测量条件和精度要求也各不相同,因此测压仪表的种类极多。有些测压仪表如液柱式、浮标式差压计等虽是常见的,但有的只适于作就地指示,有的以水银为工作液,造成环境污染,正在被淘汰。下面只介绍几种用得最多的弹性式测压元件及其变送器。

1.2.1 弹性式压力测量元件

利用弹性元件受压产生变形可以测量压力。由于其产生的位移或力较易转化为电量,且构造简单,价格便宜,测压范围宽,被测压力低至几帕,高达数百兆帕都可使用,测量精度也比较高,故在目前测压仪表中占有统治地位。工业上最常用的弹性测压元件有弹簧管、波纹管及膜片三类。

弹簧管是一种常用的弹性测压元件。由于它由法国人波登发明,所以常叫做波登管,如图 1-16(a)所示。它是一种弯成圆弧形的空心管子,管子的横截面是椭圆形的。当从固定的一端通入被测压力时,由于椭圆形截面在压力的作用下趋向圆形,使弧形弯管产生伸直的变形,其自由端产生向外的位移。此位移虽然是一个曲线运动,但在位移量不大时,可近似认为是直线运动,且位移大小与压力成正比。近年来由于材料的发展和加工技术的提高,已能制成温度系数极小、管壁非常均匀的弹簧管,不仅可制作一般的工业用压力计,也可作精密测量。

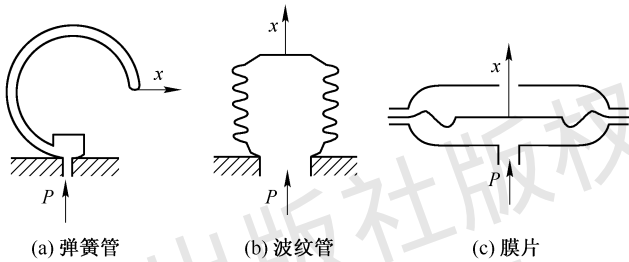


图 1-16 常用的弹性测压元件

有时为了使自由端有较大的位移,使用多圈弹簧管,即把弹簧管做成盘形或螺旋弹簧的形状,它们的工作原理与单圈弹簧管相同。

制造弹簧管的材料根据压力高低及被测介质的性质而不同,测量低压时常用磷青铜,测量中压时用黄铜,测量高压时则用合金钢或不锈钢。当被测介质有腐蚀性时,例如,测氨气的压力时,必须用不锈钢而不能用铜质弹簧管。

图 1-16(b)所示的波纹管是将金属薄管折皱成手风琴风箱形状而成的,在引入被测压力 P 时,其自由端产生伸缩变形。它比弹簧管优越的是能得到较大的直线位移,缺点是压力—位移特性的线性度不如弹簧管好。因此,经常是将它和弹簧组合一起使用,如图 1-17 所示,在波纹管内部安置一个螺旋弹簧。若波纹管本身的刚度比弹簧小得多,那么波纹管主要起压力—力的转换作用,弹性反力主要靠弹簧提供,这样可以获得较好的线性度。

图 1-16(c)所示的单膜片测压元件主要用做低压的测量,膜片一般用金属薄片制成,有时也用橡皮膜。为了使压力—位移特性在较大的范围内具有直线性,在金属圆形膜片上加工出同心圆的波纹。外圈波纹较深,越靠近中心越浅。膜片中心压着两个金属硬盘,称为硬心。当压力改变时,波纹膜与硬心一起移动。膜片式压力计的优点是可以测量微压及用于黏滞性介质的压力测量。

在自动化仪表中广泛使用膜盒元件来测量差压,其结构如图 1-18 所示。两个金属膜片分别位于膜盒的上、下两个测量室内,它们的硬心固定地连接在一起,当被测压力 P_1 、 P_2 分别从上、下两侧引入时,膜片根据差压的正负,向上或向下移动,通过硬心输出机械位移或力。在两块波纹膜片之间充有膨胀系数小、化学性能稳定、不易气化和凝固的液体——硅油。它一方面

用来传递压力,另一方面对膜片起过载保护作用。当差压突然过载时,先是硅油通过中间间隙缓慢地从一边流入另一边,起一定的缓冲作用;当硅油流过一定数量后,硬心与机座上的密封垫圈靠紧,阻止硅油继续流动,使留下的一部分硅油支持膜片顶住外加压力,保证膜盒受单向压力时,不致损坏。在新型的差压表中,膜盒机座也制成与膜片具有相同的波纹。过载时,膜片可与机座完全接触,由于波纹完全吻合,保护更加可靠。

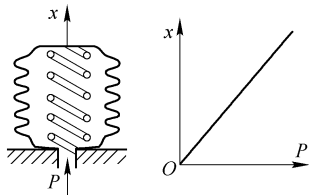


图 1-17 波纹管与弹簧的组合

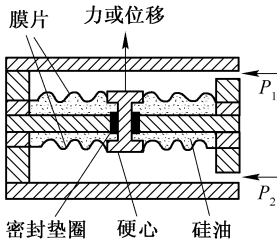


图 1-18 膜盒测压元件

上述各种弹性元件输出的位移或力必须经过变送器才能变为标准电信号。变送器有两种组成方式:一种是开环式的,先将位移或力转化为 R 、 L 、 C 等电参量,然后经一定的电路变为标准信号,这种变送器的原理虽然比较简单,但对材料、工艺和电路的要求比较高;另一种是闭环式的,利用负反馈保证仪表的精度,以往应用较多的力平衡式变送器就属于这一类。

1.2.2 力平衡式压力(差压)变送器

力平衡式压力变送器的工作原理如图 1-19 所示。被测压力 P 经波纹管转换为力 F_i 作用于杠杆左端 A 点,使杠杆绕支点 O 作逆时针旋转,稍一偏转,位于杠杆右端的位移检测元件便有感觉,使电子放大器产生一定的输出电流 I_o 。此电流流过反馈线圈和变送器的负载,并与永久磁铁作用产生一定的电磁力,使杠杆 B 点受到反馈力 F_f ,形成一个使杠杆做顺时针转动的反力矩。由于位移检测放大器极其灵敏,杠杆实际上只要产生极微小的位移,放大器便有足够的输出电流形成反力矩与作用力矩相平衡。当杠杆处于平衡状态时,输出电流 I_o 正比于被测压力 P 。

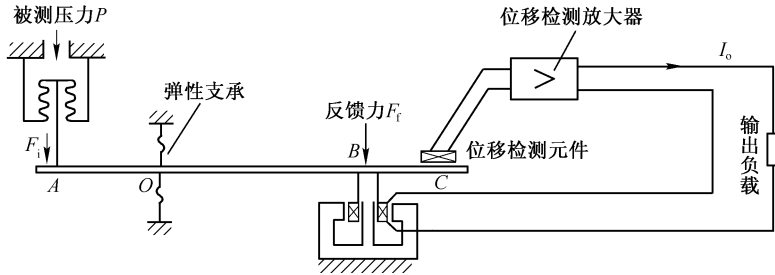


图 1-19 力平衡式压力变送器的工作原理图

这种闭环的力平衡结构的优点,首先在于当弹性材料的弹性模数温度系数较大时,可以减小温度的影响。因为这里的平衡状态不是靠弹性元件的弹性反力来建立的,当位移检测放大器非常灵敏时,杠杆的位移量很小,若整个弹性系统的刚度设计得很小,那么弹性反力在平衡状态的建立中无足轻重,可以忽略不计。这样,弹性元件的弹性力随温度的漂移就不会影响这类变送器的精度。此外,由于变换过程中位移量很小,弹性元件的受力面积能保持恒定,因而

线性度也比较好。由于位移量小,还可减少弹性迟滞现象,减小仪表的变差。

为了说明上述道理,可画出这种变送器的方块图如图 1-20 所示。被测压力 P_i 乘以波纹管的有效面积 S 便得到作用于 A 点的力 F_i ,此力再乘以对支点 O 的距离 l_{OA} 即为作用力矩

$$M_i = F_i \times l_{OA}$$

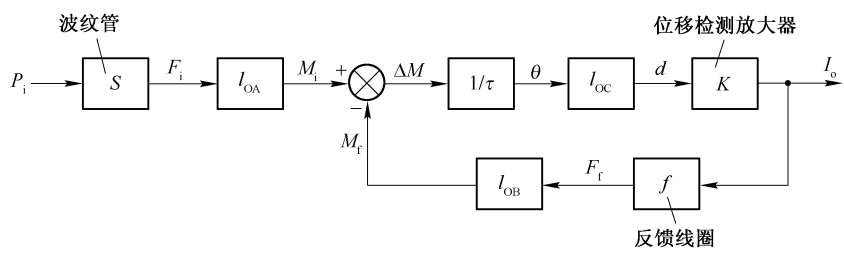


图 1-20 力平衡变送器的方块图

作用力矩 M_i 与反馈力矩 M_f 之差 ΔM 使杠杆绕 O 点旋转,转角 $\theta = \frac{\Delta M}{\tau}$ 。这里 τ 是杠杆系统的扭转刚度,它的大小表示要使杠杆产生单位转角所需的力矩。

当杠杆转动时,位移检测点 C 处就有位移 $d = l_{OC} \times \theta$,其中 l_{OC} 为检测点 C 到支点 O 的距离。该位移被检测,并转换为电流输出 I_o 。图中 K 表示位移检测放大器的传递系数。

输出电流 I_o 流过反馈线圈,产生电磁反馈力 $F_f = f \times I_o$,其中 f 为电磁铁的传递系数。此力乘以力臂 l_{OB} 即为反馈力矩 M_f 。

由图 1-20 可写出其闭环传递函数

$$I_o = \frac{\frac{1}{\tau} l_{OC} K}{1 + \frac{1}{\tau} l_{OC} K f l_{OB}} S l_{OA} P_i$$

当开环增益很大,即 $\frac{1}{\tau} \times l_{OC} \times K \times f \times l_{OB} \gg 1$ 时,上式可简化为

$$I_o = \frac{S l_{OA}}{f l_{OB}} P_i$$

由此可知,这种变送器具有一切闭环系统的共同特点,即在开环增益足够大时,其输入量与输出量间的关系只取决于输入环节及反馈环节的传递函数,而与正向通道环节的传递函数无关。在图 1-20 中,杠杆系统(包括弹性测量元件)的刚度 τ 和位移检测放大器的传递系数 K 都处于正向通道内,只要开环增益足够大,它们的变化不会影响输出值 I_o 。因此,弹性测量元件的弹性模数随温度的变化,不会影响仪表的精度。

这里需要说明,力平衡仪表虽然对弹性反力的变化不甚敏感,但对杠杆系统任何一处存在的摩擦力却是十分敏感的,因为摩擦力矩的引入相当于在比较点引入干扰,会直接引起误差,造成死区和变差。为此,力平衡仪表中支承点都使用弹簧钢片做成弹性支承,以避免摩擦力的引入。

从上面的分析看到,在力平衡变送器中,只要测压元件的有效面积 S 能保持恒定,磁铁的磁场强度均匀稳定,力臂的长度 l_{OA} 、 l_{OB} 不变,便可得到较好的变换精度。

1.2.3 位移式差压(压力)变送器

技术的发展常常是螺旋式上升的。最早的电信号压力计都是开环结构,先将弹性测压元件的位移转换为电感、电阻或电容的变化,再经一定的电路转换后输出。由于当时材料质量和工艺水平不高,弹性元件的弹性模数随温度变化很大,因而平衡位置受温度影响大,即输出的温度漂移较大。另外,早期的位移测量技术不高,测压元件必须有足够大的变形才能测量,因而使弹性元件的非线性和变差都比较大。在这样的条件下,力平衡式变送器的研制成功是一个重大的飞跃。力平衡式变送器中弹性元件的变形很小,又是一个闭环系统,借助于负反馈,能减小温度变化、弹性滞后及变形非线性等因素的影响,大大提高测量精度,成为前一段时期压力变送器的主要形式。

随着科学技术的发展,材料弹性模数随温度变化的问题获得了很大的改善,例如,镍铬钛钢(Ni:41%~43%,Cr:4.9%~5.5%,Ti:2.1%~2.6%,Al:0.03%~0.8%,其余为铁)等材料的弹性模数温度系数小于 $0.2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,因而在环境温度变化时,其弹性模数几乎可认为不变。此外,电子检测技术的发展,使微小位移的检测成为可能,弹性元件只要有 0.1mm 左右的位移便可精确地测量出来。由于变形小,非线性和弹性迟滞引起的变差也可大大减小,这些发展使位移式的开环变送器重又得到了新生。实践证明,只要工艺技术过关,这种新的开环变送器不难超过目前力平衡变送器所达到的基本精度为 0.5% 的指标。而其结构的简单,运行的可靠,维护的方便,更是目前的力平衡式仪表所无法比拟的。

作为这种新的位移式变送器的例子,图 1-21 示出了一个电容式差压变送器的基本结构。被测压力 P_1 、 P_2 分别加于左、右两个隔离膜片上,通过硅油将压力传送到测量膜片。该测量膜片由弹性温度稳定性好的平板金属薄片制成,作为差动可变电容的活动电极,在两边压力差的作用下,可左右位移约 0.1mm 的距离。在测量膜片左右,有两个用真空蒸发法在玻璃凹球面制成的金属固定电极。当测量膜片向一边鼓起时,它与两个固定电极间的电容量一个增大,一个减小,通过引出线测量这两个电容的变化,便可知道差压的数值。

这种结构对膜片的过载保护非常有利。在过大的差压出现时,测量膜片平滑地贴紧到一边的凹球面上,不会受到不自然的应力,因而过载后恢复特性非常好。

图中隔离膜片的刚度很小,在过载时,由于测量膜片先停止移动,堵死的硅油便能支持隔离膜顶住外加压力,隔离膜的背后有波形相同的靠山,进一步提高了它的安全性。

这种差压变送器的结构和力平衡式变送器相比有一突出的优点,就是它不存在力平衡式变送器必须把杠杆穿出测压室的问题。我们看到,在力平衡式变送器中为使输出杠杆既能密封又能转动,使用了弹性密封膜片,这带来一个棘手的问题——静压误差。由于密封膜片在压力作用下的变形,会使杠杆产生轴向位移,必须用吊带把杠杆拉住,但它很容易产生偏心。此外,杠杆在密封膜片上的安装也很难完全同心,这样,弹性密封膜片受力时,会对杠杆造成附加的偏转力。尽管两个测量室的压力差为零,即 $P_1 - P_2 = 0$ 时,只要 P_1 、 P_2 的值不为零,杠杆上就会受到偏转力,由这种附加力引起的误差称为静压误差。在力平衡式差压变送器中,这是一

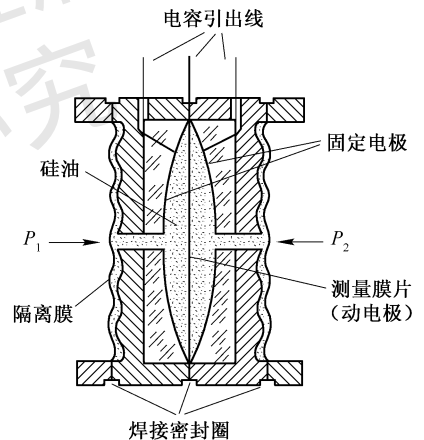


图 1-21 电容式差压变送器的基本结构

下面讨论电容式差压变送器的工作原理。为此,先分析一下差动电容与压力的变化关系,设测量膜片在差压 P 的作用下移动一个距离 Δd ,由于位移很小,可近似认为两者作比例变化,即可写成

式中, K_1 为比例常数。

$$C_1 = \frac{K_2}{d_0 + \Delta d}$$

$$C_2 = \frac{K_2}{d_0 - \Delta d}$$

联立解上列关系式,可得出差压 P 与差动电容 C_1 、 C_2 的关系如下

这里 $K_3 = K_1/d_0$ 也是一个常数。

$$I_1 = \frac{I_0}{C_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} = I_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$
$$I_2 = \frac{I_0}{C_1 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} = I_0 \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$
$$I_0 = I_1 + I_2$$

令 V_1, V_2, V_4 表示 R_1, R_2, R_4 上的压降, 即令 $V_1 = I_1 R_1, V_2 = I_2 R_2, V_4 = I_0 R_4$, 则可得

$$\frac{V_1 - V_2}{V_4} = \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{(C_1 + C_2) R_4}$$

若取 $R_1 = R_2 = R_4$, 则上式可化为

$$\frac{V_1 - V_2}{V_4} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (1-6)$$

对照式(1-5)知

$$\frac{V_2 - V_1}{V_4} = K_3 P$$

在实际变送器中,用负反馈自动改变输入电压 E_1 的幅度,使差动电容 C_1 、 C_2 变化时,流过它们的电流之和恒定,即保持上式中 V_4 恒定,这样差压 P 正比于 $(V_2 - V_1)$,测量 R_1 、 R_2 上电压差即可测知 P 。这种变送器的原理线路如图 1-23 所示。

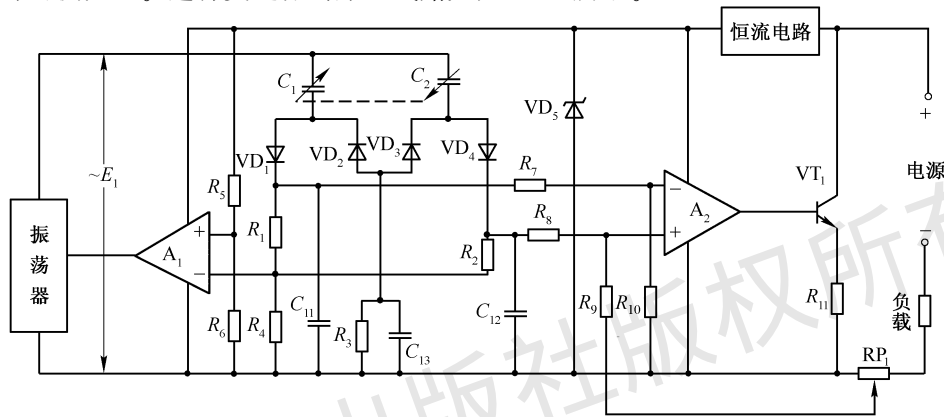


图 1-23 差动电容式压力变送器的原理线路图

图 1-23 中,运算放大器 A_1 作为振荡器的电源供给者,可用来调节振荡器输出电压 E_1 的幅度,通过负反馈,保证 R_4 两端的电压恒定。放大器 A_2 用来将 R_1 、 R_2 两端的电压相减,并通过电位器 RP_1 引入输出电流的负反馈,调节 RP_1 可改变变送器的量程。显然,这个变送器是一个两线制变送器。图中右上角的恒流电路保持变送器基本消耗电流恒定,构成输出电流的起始值,流过晶体管 VT_1 的电流则随被测压力的大小作线性变化。

随着对测量精度要求的提高和微处理器的广泛应用,变送器逐渐向数字化和智能化方向发展。对各种不同的仪表可按误差产生的原因,利用微处理器强大的运算功能进行针对性的补偿,使测量精度大大提高。

以差压变送器为例,影响其精度的因素主要有:(1)测量元件的非线性;(2)测量元件工作温度变化引起的温度漂移;(3)静压误差。这里的静压误差是指在相同的差压数值下,由于压力不同引起的误差。举例说明,若第一种情况下差压变送器的左侧输入绝对压力 $P_1 = 0$ (即真空状态),右侧输入 $P_2 = 1\text{kPa}$ (这里都指绝对压力),两侧的压差为 1kPa ;在第二种情况下,若 $P_1 = 10\text{MPa}$, $P_2 = 10.001\text{MPa}$,两侧的压差也是 1kPa ;尽管这两种情况下差压相同,但后一种状况下变送器壳体因受到很大的压力而产生机械变形,引起输出漂移,成为差压变送器的重要误差因素。在智能变送器中,按误差分析,增加辅助传感器,测量各种可能的误差来源,并通过自动化的实验手段逐个测定传感器的误差特性,给出误差补偿算式,作为每个传感器的档案数据写入存储芯片。在智能变送器现场使用中,微处理器可根据传感器的档案数据,对误差给予精确补偿,把变送器的精度提高一个数量级,差压/压力变送器的精度约可达到 0.05 级的水平。

智能差压变送器的原理方框图可表示为图 1-24,其输入端除差压传感器外,还配置了温度传感器和静压传感器。差压传感器信号进入 CPU 后,先经量程变换和线性化处理,再按温度和静压信号从 ROM 中读取修正数据,进行误差补偿后,一方面送人机界面,通过液晶面板或电流表作仪表的就地显示,也可通过按钮进行量程修改及零点迁移;另一方面,经 D/A 转换器输出 4~20mA 电流信号,并通过通信接口芯片,与外界进行数字通信。

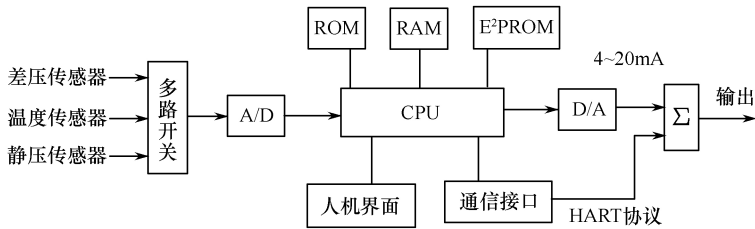


图 1-24 智能差压变送器的原理框图

众所周知,传统的模拟式变送器另一重大不足之处是,只能向外给出 4~20mA 电流信号,在一对导线上只能传送一个变量信号。随着多变量、多功能仪表的出现,用户希望获得仪表内更多的信息,这样,4~20mA 的模拟输出方式成为制约仪表间信息交换的瓶颈。智能变送器为解决这个问题,都配置了数据通信接口,图 1-24 中给出的是一种最早被使用的智能变送器通信方式,这种称为 HART 协议的通信是一种模拟与数字兼容的信号传输方式,通信接口电路将幅度为±0.5mA 的交流调制信号与 D/A 转换器输出的 4~20mA DC 电流信号相加,作为变送器的输出信号。由于所叠加的交流调制信号是正弦波,其平均值为零,对传统的 4~20mA 用户不受影响。对需要更多信息交换的用户,可利用叠加的调制信号进行双向通信,读取变送器内的数据,并远程修改变送器的零点和量程。

近年来,随着现场总线控制技术的发展和智能变送器的通信越来越多采用全数字的现场总线通信协议,在现场总线通信方式,智能仪表的输出摒弃了传统的 4~20mA 模拟信号,仪表间信息传递完全采用数字通信技术,这样一来,使仪表的功能可以大大扩展,关于这些内容将在第 3 章中详细介绍。

1.2.4 固态测压仪表

上面讨论的测压仪表都是利用弹性元件产生变形工作的,仪表内总包含一个运动部分,固态测压仪表是利用某些元件固有的物理特性,如利用压电效应(压电体受压力作用时表面出现电荷)、压磁效应(磁性材料受压时各方向的磁导率发生变化)、压阻效应(半导体材料受压时电阻率发生变化)等直接将压力转换为电信号。由于没有活动部件,仪表的结构非常简单,工作可靠,频率响应范围较宽。

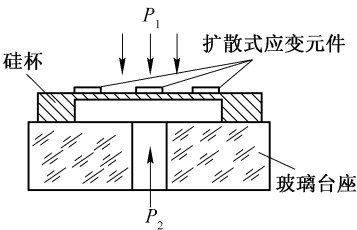


图 1-25 是一种根据压阻效应工作的半导体压力测量元件的示意图,在杯状单晶硅膜片的表面上,沿一定的晶轴方向扩散着一些长条形电阻。当硅膜片上下两侧出现压差时,膜片内部产生应力,使扩散电阻的阻值发生变化。

需要说明,这里扩散电阻的变化,在机理上和金属丝应变电阻不同。普通的金属电阻丝受力变形时,其电阻的变化是由几何尺寸变化引起的,即由电阻丝的长度 l 和截面积 S 的变化引起。而半导体扩散电阻在受应力作用时,材料内部晶格之间的距离发生变化,使禁带宽度及载流子浓度和迁移率改

变,导致半导体材料的电阻率 ρ 发生强烈的变化。实践表明,半导体扩散电阻的电阻变化主要是由电阻率 ρ 的变化造成的,其灵敏度比金属应变电阻高 100 倍左右。

为了减小半导体电阻随温度变化引起的误差,在硅膜片上常扩散 4 个阻值相等的电阻,以便接成桥式输出电路获得温度补偿,如图 1-26 所示。力学分析表明,平面式的弹性膜片受压变形时,中心区与四周的应力方向是不同的。当中心区受拉应力时,周围区域将受压应力,离中心为半径 60%左右的地方,应力为零。根据这样的分析,在膜片上用扩散方法制造电阻时,将 4 个桥臂电阻中的两个置于受拉区,另两个置于受压区,这样,按图 1-26(a)接成推挽电路测量压力时,电阻温度漂移可以得到很好的补偿,而输出电压加倍。在使用几伏的电源电压时,桥路输出信号幅度可达几百毫伏。这样,后面只要用一个不太复杂的电路,便可转换为标准电信号输出。

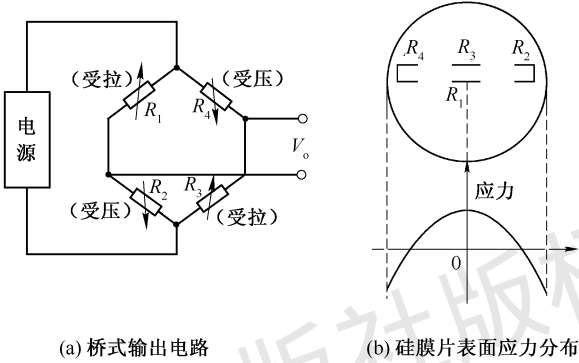


图 1-26 扩散在硅膜片上的四个桥臂电阻

在图 1-25 中,硅杯被烧结在膨胀系数和自己相同的玻璃台座上,以保证温度变化时硅膜片不受附加应力。尽管如此,由于半导体材料对温度的敏感性,温度漂移始终是这类传感器的主要问题。为解决这一问题,常在硅膜片上同时扩散专用的温度测量电阻,以便按扰动补偿的原则,在宽范围内进行准确的温度补偿。在工业测量中,为避免被测介质对硅膜片的腐蚀或毒害,硅膜片被置于图 1-21 相似的膜盒内,被测介质在隔离膜片之外,压力只能通过膜盒内中性的硅油传递给硅膜片。目前用这种敏感元件制成的压力仪表精度可达 0.25 级或更高。其主要优点是结构简单,尺寸小,便于用半导体工艺大量生产,降低价格,因而成为低价位压力变送器的主流产品。

1.3 流量检测仪表

在连续生产过程中,有大量的物料通过管道来往输送。因此,对管道内液体或气体的流量进行测量和控制,是生产过程自动化的一项重要任务。

工程上,流量是指单位时间内通过某一管道的物料数量。其常用的计量单位有下面两种:

① 体积流量 Q ,即以体积表示单位时间内的物料通过量,用 l/s (升/秒)、 m^3/h (立方米/小时)等单位表示;

② 质量流量 Q_m ,即以质量表示单位时间内的物料通过量,常用单位为 kg/s (千克/秒)、 t/h (吨/小时)等。显然质量流量 Q_m 等于体积流量 Q 与物料密度 ρ 的乘积。

除了上述瞬时流量外,生产上还需要测定一段时间内物料通过的累计量,称为总流量。为

此,可在流量计上附加积算装置,进行瞬时流量对时间的积分运算,以获得一段时间内通过的物料总体积或总质量。

流量的测量方法较多,按原理分,有节流式、容积式、涡轮式、电磁式、旋涡式等,它们各有一定的适用场合。

1.3.1 节流式流量计

在管道中放入一定的节流元件,如孔板、喷嘴、靶、转子等,使流体流过这些阻挡体时,流动状态发生变化。根据流体对节流元件的推力或在节流元件前后形成的压差等,可以测定流量的大小。

1. 差压流量计

根据节流元件前后的压差测量流量的流量计称为差压流量计,主要由节流装置及差压计两部分组成。图 1-27 表示的是常见的使用孔板作为节流元件的例子,在管道中插入一片中心开孔的圆盘,当流体经过这一孔板时,流束截面缩小,流动速度加快,压力下降。依据伯努利方程,在水平管道上,孔板前面稳定流动段 I—I 截面处的流体压力 P_1' 、平均流速 v_1 ,与流束收缩到最小截面的 II—II 处的压力 P_2' 、平均流速 v_2 间必存在如下关系

$$\frac{P_1'}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2'}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + \xi \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-7)$$

式中, ξ 表示流体在截面 I—I 与 II—II 间的动能损失系数, g 为重力加速度, ρ_1 、 ρ_2 分别表示流体在截面 I—I 和 II—II 处的密度,如果流体是不可压缩的,那么 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 。

式(1-7)是能量守恒定律的一种表示形式。它说明当流体流过节流元件时,随着流速的增加,压力必然降低。在流束的截面收缩到最小处,由于流速达到最大值,压力降至最低点,实践证明,孔板前后的流体压力变化如图 1-27 中曲线 P 所示,其中虚线表示管道中心处的压力,实线表示管壁附近的压力。在靠近孔板的前面管壁处,由于流动被突然阻挡,动能转化为压力位能,使局部压力 P_1 增高超过压力 P_1' 。

由流体流动的连续性方程可知,流过管道的流体体积流量为

$$Q = v_1 F_1 = v_2 F_2 \quad (1-8)$$

式中, F_1 、 F_2 分别为 I—I 和 II—II 处的流束截面积, F_1 等于管道的截面积。

联立求解式(1-7)和式(1-8)可得出

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2 + \xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1' - P_2')} \quad (1-9)$$

直接按上式计算流速是困难的,因为 P_2' 和 F_2 都要在流束截面收缩到最小的地方测量,而它的位置是随流速的不同而改变的。为简化问题,引入截面收缩系数 μ 和孔板口对管道的面积比 m

$$\mu = \frac{F_2}{F_0}, \quad m = \frac{F_0}{F_1}$$

这里 F_0 是孔板的开孔面积。

此外,用固定取压点测定的压差代替式中的 $(P_1' - P_2')$,工程上常取紧挨孔板前后的管壁压差 $(P_1 - P_2)$ 代替 $(P_1' - P_2')$,显然它们的数值是不相等的,为此引用系数 ψ 加以修正

$$\psi = \frac{P_1' - P_2'}{P_1 - P_2}$$

将这些关系代入式(1-9),得

$$v_2 = \sqrt{\frac{\psi}{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1-10)$$

根据式(1-8),体积流量

$$Q = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1-11)$$

令

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \quad (1-12)$$

式中, α 称为流量系数。这样,

体积流量

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1-13)$$

质量流量

$$Q_m = \rho Q = \alpha F_0 \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (1-14)$$

上面的分析说明,在管道中设置节流元件可造成局部的流速差异,得到比较显著的压差。在一定的条件下,流体的流量与节流元件前后的压差平方根成正比。因此,可使用差压变送器测量这一差压,经开方运算后得到流量信号。由于这种变送器需要量较大,单元组合仪表中生产了专门的品种,将开方器和差压变送器结合成一体,称为差压流量变送器,可直接和节流装置配合,输入差压信号,输出流量信号。

需要指出,上述的流量关系式在形式上虽然比较简单,但流量系数 α 的确定却十分麻烦。由 α 的定义可知,它与 μ 、 ψ 、 m 、 ξ 等有关。大量的实验表明,只有在流体接近于充分湍流时, α 才是与流动状态无关的常数。流体力学中常用雷诺数(Re)反映湍流的程度, $Re = vD\rho/\eta$ (这里 v 为流速, D 为管道内径, ρ 为流体密度, η 为流体动力黏度),这是一个无因次量。流量系数 α 只在雷诺数大于某一界限值(约为 10^5 数量级)时才保持常数。

不难理解,流量系数的大小与节流装置的形式、孔口对管道的面积比 m 及取压方式密切相关。目前常用的标准化节流元件除孔板外,还有压力损失较小的均速管、喷嘴和文丘利管等;取压方式除图1-30所表示的,在孔板前后端面处取压的“角接取压法”外,还有在孔板前后各一英寸处的管壁上取压等方法。在这些不同的情况下流量系数都是不同的。此外,管壁的粗糙度、孔板边缘的尖锐度、流体的黏度、温度及可压缩性都影响这一系数的数值。由于差压流量计已有很长的使用历史,对一些标准的节流装置曾进行过大量的实验研究,已经有一套十分完整的数据资料。使用这种流量计只要查阅有关手册,按照规定的标准,设计、制造和安装节流装置,便可根据计算得到的流量系数直接投入使用,不需再用实验方法单独标定量程。

差压流量计在使用中必须保证节流元件前后有足够长的直管段,一般要求前面有7~10倍直径,后面有3~5倍直径的直管段。差压流量计在较好的情况下测量精度为 $\pm 0.5\% \sim 1\%$,由

于雷诺数及流体温度、黏度、密度等的变化,以及孔板边缘的腐蚀磨损,精度常低于 $\pm 2\%$ 。

尽管差压流量计精度较差,但它结构简单,制造方便,目前还是使用很普遍的一种流量计。

2. 均速管流量计

均速管流量计也是一种差压式流量计,其工作原理如图 1-28 所示。在被测管道中插入一根检测杆,最简单的检测杆可以是一根圆形金属管,在内部用薄板分隔成前后两个测量室。沿检测杆长度方向,在迎流面和背流面各按一定规律开若干个取压小孔,当管道中有液体或气体流动时,随着流体的流速增加,迎流面小孔的压力将上升,背流面小孔的压力将下降,其压差可反映流体的流速变化。

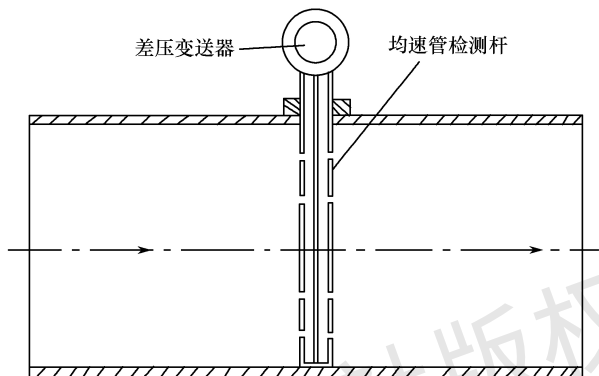


图 1-28 均速管流量计的工作原理图

考虑到流体在管道内流动时,由于流体在管壁附近与管道中心位置受到的摩擦阻力不同,其流动速度有所不同,所以离管道中心远近不同的取压孔的压力是不同的。为此检测杆需要借助测量室,把同侧多个小孔的压力取样值作平均处理,以平均差压反映管道内的平均流速,这就是这种检测杆称为均速管的原因。

将均速管的前、后两个测量室的平均压力引出,用差压变送器测量两者的压力差 ΔP ,根据伯努利方程,可建立管道流体的平均流速 V_{av} 与差压 ΔP 之间的关系式

$$V_{av} = \xi \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (1-15)$$

式中, ρ 为流体密度, ξ 为与均速管结构有关的校正系数。

将平均流速 V_{av} 乘以管道截面积,可得到体积流量

$$Q_v = A \cdot V_{av} = \xi A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (1-16)$$

均速管流量计的特点是结构简单、安装方便、对流体的阻力较小(一般压力损失仅为孔板流量计的十分之一),在管径超过 300mm 的大口径管道流量测量中处于首选位置,可适用于气体、液体及蒸气等各种介质的流量测量。

早期的均速管流量计误差较大,一般达到 $2\% \sim 3\%$,作为物料计量精度不够,因而主要用于回路控制,例如在锅炉燃烧自动控制中,用它测量助燃空气流量,控制燃料与空气的比例,提高燃烧效率。这里只要流量计输出与流量间存在确定的单值函数关系,即重复性较好就可以了。

随着均速管流量计的工业应用日趋广泛,为提高其测量精度,国内外进行了深入研究、不断改进,对检测杆的截面形状、测点位置、取压方式以及安装结构等方面,精益求精进行创新,

推出了种类繁多的特色结构,商品名称有阿牛巴(Annubar)、威力巴(Verabar)、德尔塔巴(Deltabar)等,尽管基体工作原理未变,但通过优选检测杆截面形状,有的取菱形,有的取T形、子弹头形等,使差压 ΔP 增大,压力损失减小,式(1-16)中的校正系数 ξ 在更宽的流速变化范围内保持恒值,使测量精度可以达到0.5%,重复性达到0.1%。并在一定程度上降低了检测杆前后直管段的长度要求。

均速管流量计因为必须用小孔来测量平均流速,只要流体中有颗粒或凝析物就容易堵塞,对此,新的设计是加大检测孔径(有的达到8mm)或配备吹扫装置给予解决。

3. 转子流量计

在小流量的测量中,例如流量只有几升/小时~几百升/小时的场合,转子流量计是使用最广的一种流量计。其工作原理也是根据节流现象,但节流元件不是固定地安置在管道中,而是一个可以移动的转子。其基本结构如图 1-29 所示,一个能上下浮动的转子被置于圆锥形的测量管中,当被测流体自下而上通过时,由于转子的节流作用,在转子前后出现压差 ΔP ,此压差对转子产生一个向上的推力,使转子向上移动。由于测量管上口较大,因而能取得平衡位置。平衡时,压差 ΔP 产生的向上推力等于转子的重量,故平衡时 ΔP 必为恒值。

根据式(1-13)有

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

若 ΔP 、 ρ 、 α 均为常数,则流量 Q 与 F_0 成正比。对圆锥形测量管,环形缝隙的流通面积 F_0 与转子的高度近于成正比,故可从转子的平衡位置高低,直接读出流量的数值,或用电感发送器将转子位置转换为电信号,供记录或自动调节用。

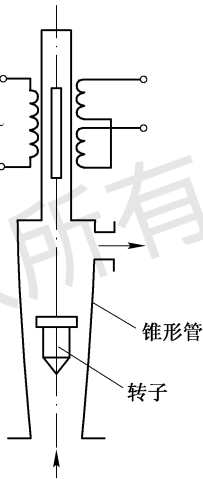


图 1-29 转子流量计

1.3.2 容积式流量计

容积式流量计的代表性产品是椭圆齿轮流量计,其基本结构如图 1-30 所示。在金属壳体内有一对啮合的椭圆形齿轮(齿较细,图中未画出),当流体自左向右通过时,在输入压力的作用下,产生力矩,驱动齿轮转动。例如,在图 1-30(a)位置时,A 轮左下侧压力大,右下侧压力小,产生的力矩使 A 轮作顺时针转动,它把 A 轮与壳体间半月形容积内的液体排至出口,并带动 B 轮转动;在图 1-30(b)的位置上,A 和 B 两轮都有转动力矩,继续转动,并逐渐将一定的液体封入 B 轮与壳体间的半月形空间;到达图 1-30(c)位置时,作用于 A 轮上的力矩为零,但 B 轮的左上侧压

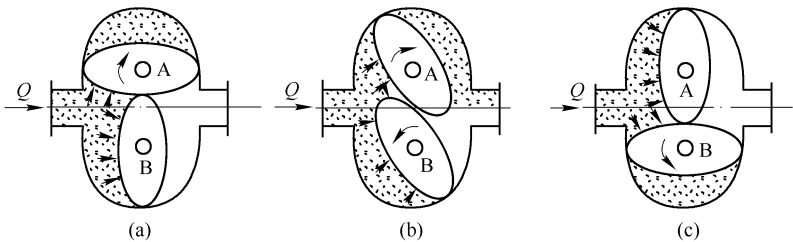


图 1-30 椭圆齿轮流量计的原理图

力大于右上侧,产生的力矩使 B 轮成为主动轮,带动 A 轮继续旋转,把半月形容积内的液体排至出口。这样连续转动,椭圆齿轮每转一周,向出口排出四个半月形容积的液体。测量椭圆齿轮的转速便知道液体的体积流量,累计齿轮转动的圈数,便可知道一段时间内液体流过的总量。

由于椭圆齿轮流量计是直接按照固定的容积来计量流体的,所以只要加工精确,配合紧密,防止腐蚀和磨损,便可得到极高的精度,一般可达 0.2%,较差的亦可保证 0.5%~1%的精度,故常作为标准表及精密测量之用。

椭圆齿轮流量计的精度与流体的流动状态,即雷诺数(Re)的大小无关,被测液体的黏度愈大,齿轮间隙中泄漏的量愈小,引起的误差愈小,特别适宜于高黏度流体的测量。但被测流体中不能有固体颗粒,否则容易将齿轮卡住或引起严重磨损。此外,椭圆齿轮的工作温度不能超出规定的范围,不然由于热胀冷缩可能发生卡死或增加测量误差。

1.3.3 涡轮流量计

由于差压式流量计精度低,而容积式流量计价格太贵,在 20 世纪 50 年代出现了涡轮流量计,其精度介于前两者之间,为 0.25%~1.0%。

涡轮流量计的结构如图 1-31 所示,涡轮的轴装在管道的中心线上,流体沿轴向流过涡轮时,推动叶片,使涡轮转动,其转速近似正比于流量 Q 。

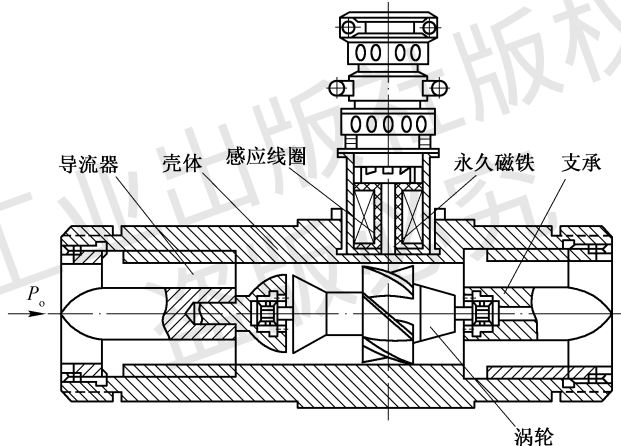


图 1-31 涡轮流量计的结构

涡轮流量计的转速输出,由于轴在管道里面不便直接引出,都采用非接触的电磁感应方式,图 1-31 所表示的是一种根据磁阻变化产生脉冲的输出方式。在不导磁的管壳外,放着一个套有感应线圈的永久磁铁,因为涡轮叶片是导磁材料制成的,涡轮旋转时,每片叶片经过磁铁下面时,都改变磁路的磁阻,使通过线圈的磁通量发生变化,感应输出电脉冲。这种脉冲信号很易远传,而且积算总量特别方便,只需配用电子脉冲计数器即可。若需指示瞬时流量,可使用单元组合仪表中的频率—电流转换单元。

涡轮流量计一般用来测量液体的流量。虽然也可测量气体流量,但由于气体密度低,推动力矩小,且高速旋转的涡轮轴承在气体中得不到润滑而容易损坏,故很少用于气体。

为保证流体沿轴向推动涡轮,涡轮前后都装有导流器,把进出的流体方向导直,以免流体的自旋改变与叶片的作用角,影响测量精度。尽管这样,在安装时仍要注意,在流量计前后必须有一定的直管段。一般规定,入口直段的长度应为管道直径的 10 倍以上,出口直段长度为管道直径的 5 倍以上。

涡轮流量计的优点是刻度线性,反应迅速,可测脉冲流量。但这种流量计的读数也受流体黏度和密度的影响,也只能在一定的雷诺数范围内保证测量精度。由于涡轮流量计内部有转动部件,易被流体中的颗粒及污物堵住,只能用于清洁流体的流量测量。

1.3.4 电磁流量计

以上几种流量测量方法都要在管道中设置一定的检测元件,总会造成一定的压力损失,而且容易堵塞或卡住。电磁流量计采用了完全不同的原理,以电磁感应定律为基础,在管道两侧安放磁铁,以流动的液体当作切割磁力线的导体,由产生的感应电动势测知管道内液体的流速和流量。

电磁流量计的基本原理可表示如图 1-32 所示。在一段不导磁的测量管两侧装上一对电磁铁,被测液体由管内流过,管壁上在与磁场垂直的方向上,有一对与液体接触的电极。根据电磁感应定律,若管道内磁感应强度为 $B(\text{T})$,管内流体的流速为 $v(\text{cm/s})$,切割磁力线的导体的长度就是两个电极间的距离,也就是管道内径 $D(\text{cm})$,则感应电动势

$$e = BDv \times 10^{-8}$$

由于体积流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ 与流速 v 有如下关系

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4}$$

故

$$e = \frac{4B}{\pi D} Q \times 10^{-3}$$

由此可见,流量正比于感应电动势 e 。

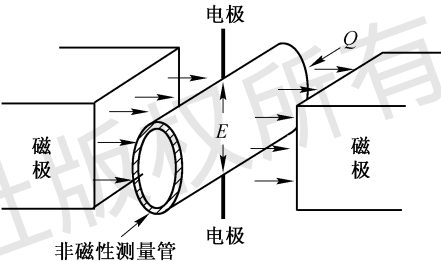
图 1-32 电磁流量计的基本原理

实际的电磁流量计中,流量电动势只有几毫伏到几十毫伏。为避免电极在直流电流作用下发生极化作用,同时也为了避免接触电动势等直流干扰,管道外的磁铁都使用交流激磁。这样磁场是工频交变磁场,获得的流量电动势也是交变的,可用专门的交流放大器放大。当然使用交流激磁也会带来新的问题,即交流磁场会直接在电极回路中产生感应干扰电动势。由于这种感应干扰电动势的相位与交变磁感应强度 B 的相位相差 90° ,而流量电动势却是与 B 同相位的,可从相位上予以区别而抑制之。

在使用交流电激磁时,测量管应使用高电阻率的非导磁材料,如玻璃钢或不锈钢等制成,以减少管壁上的涡流。在使用不锈钢作测量管时,除电极需与管壁绝缘外,为避免流体中的电动势被管壁短路,影响测量电极输出电动势的幅度,需要在整根测量管的内壁涂以绝缘层或衬垫绝缘套管。

电磁流量计的优点是管道中不设任何节流元件,因此可以测各种黏度的液体,特别宜于测量含各种纤维及固体污物的液体。此外,对腐蚀性液体也很适用,因为测量管中除一对由不锈钢或金、铂等耐腐蚀材料制成的电极与流体直接接触外,没有其他零件和流体接触,工作非常可靠。电磁流量计的测量精度为 $0.5\% \sim 1\%$,刻度线性,测量范围宽量程比可达 $1:30$,反应速度快,且可测水平或垂直管道中来回两个方向的流量。

从电磁流量计的工作原理看出,它只能测导电液体的流量,被测液体的电导率至少为 $1 \sim 10 \mu\Omega/\text{cm}$ (自来水的电导率约为 $100 \mu\Omega/\text{cm}$),不能测量油类及气体的流量。此外被测液体中不能含大量气泡,由于气泡是不导电的,它的存在将使输出电动势发生强烈波动,影响准确测量。



在安装电磁流量计时,要注意远离电力电源,避免大电流通过测量管内的流体,以减小测量干扰。在使用中也要注意维护,使用日久,若电极处污垢沉积过多,不论这些污物是绝缘的还是导电的,都会影响测量精度,必须适时清理电极及测量管的内表面。

1.3.5 旋涡式流量计

这是 20 世纪 60 年代后期发展起来的一类新型的流量仪表,根据旋涡形式的不同可分为如下两种:一种是在管道内设置螺旋形导流片,强迫流体产生围绕流动轴线旋转的旋进旋涡,根据旋涡旋转的角速度(旋进频率)与流量的关系测定流量,称为旋进型旋涡流量计;另一种是在管道内横向设置阻流元件,使流体因附面层的分离作用产生自然振荡,在下游形成两排交替的旋涡列,根据旋涡产生的频率与流量的关系测定流量,称为卡曼型旋涡流量计或涡街流量计。目前涡街流量计发展较快,应用较多,下面叙述这种流量计的工作原理。

如图 1-33 所示,在管道内垂直于流体流动方向插入一根非流线型物体时,在阻挡物的下游会产生旋涡。在有些情况下,流体会产生有规则的振荡运动,在阻挡物的上下两侧形成两排内旋的、互相交替的旋涡列,它们以比流体稍慢的速度向下游运动。由于流体的黏性,旋涡将在行进过程中逐渐衰减而最后消失。通常人们把这两排旋涡称为卡曼旋涡,或称涡街。据卡曼研究,大多数的旋涡排列是不稳定的。只有在旋涡排成两列,且涡列之间的宽度 h 与同列中相邻旋涡的距离 l 之比: $h/l=0.281$ 的情况下,旋涡列才是稳定的。

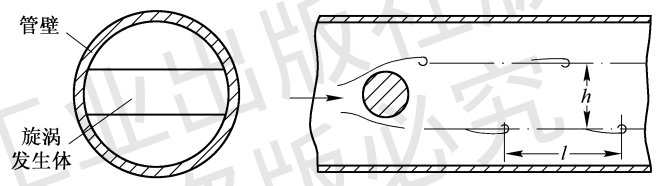


图 1-33 涡街流量计的原理图

研究表明,卡曼旋涡产生的频率 f 与流体流速 v 和旋涡发生体(插入流体以产生涡街的物体)的形状和尺寸比例有确定的关系,可表示为

$$f = Sr \frac{v}{d}$$

式中, d 为旋涡发生体的特征尺寸,对图示圆柱形旋涡发生体来说, d 就是圆柱体的直径。

Sr 是一个无量纲的系数,称为斯特劳哈尔系数。它除与旋涡发生体的形状及发生体与管道尺寸的比例有关外,还与流动的雷诺数有关。在优选的旋涡发生体形状和尺寸比例下, Sr 可在很宽的雷诺数范围内保持恒定。例如,对液体, Sr 可在雷诺数为 $(5 \sim 500) \times 10^3$ 的宽阔范围内保持恒值。这实际上已包含了工业流量测量的雷诺数的全部范围,因而在作为流量计使用时,对确定的旋涡发生体,旋涡频率 f 正比于流体流速 v 。

若管道的流通面积为 A ,则体积流量

$$Q = Av = A \frac{d}{Sr} f = Kf$$

式中, $K=Ad/Sr$ 为比例常数。

这样,只要检测旋涡频率 f 便可测得体积流量 Q 。

涡街流量计的优点是测量精度高,测量范围大,工作可靠,压力损失也比较小;其读数不受流体物理状态如温度、压力、密度、黏度及组成成分的影响,量程比可达 30 : 1;非线性误差不超过最大流量的 $\pm 1\%$,再现性为 $\pm 0.2\%$ 。由于管道中没有可动部件,运行可靠,安装维护方便。其输出为脉冲信号,易于和数字仪表及计算机配合工作,且不仅可测液体,也可测气体的流量,所以很受欢迎。

为测量流量而插入管道内的旋涡发生体,目前尚无确定其最佳形状和尺寸比例的法则,因此研制者都在实验上花力气。对旋涡发生体的要求是产生的旋涡强烈,且在较宽的雷诺数范围内旋涡稳定,斯特劳哈尔系数保持恒定。此外还要求压力损失较小,发生体形状简单,便于加工制造。目前,国内外采用的旋涡发生体形状很多,其基本形状有三种,即圆柱形、方柱形和三角柱形。它们的特点分别为:圆柱形压力损失小,但旋涡偏弱;方柱形状简单,便于加工,旋涡强烈,但压力损失大;三角柱旋涡强烈稳定,压力损失适中。很多涡街流量计中,旋涡发生体采用上述三种基本形的组合形状。

管道内流体旋涡的检测,可利用热、电、声等各种物理方法。例如,可根据旋涡发生体下游交替出现旋涡时,发生体两侧流体的流速和压力会发生周期性变化的特征进行检测,如图 1-34(a)所示。在三角柱旋涡发生体正面两侧埋入两个半导体热敏电阻,工作时以恒定电流进行加热。由于流体产生旋涡的一侧流速较小,使该侧热敏电阻散热条件差,温度较高,阻值较另一侧热敏电阻为低。把这两个热敏电阻接成电桥的两臂,便可由桥路获得与旋涡频率相同的交变信号。图 1-34(b)表示的是另一种用热学方法检测旋涡的方法,圆柱形旋涡发生体的内腔用隔板分成上下两部分,在隔板中心位置上有一根很细的铂电阻丝,被电流加热到规定的温度(一般约比流体温度高 20°C)。工作时,在产生旋涡的一侧流体流速较低,静压比另一侧高,使一部分流体由导压孔进入内腔,向未产生旋涡的一侧流动,经过铂丝,将它的热量带走,铂丝温度降低,电阻减小。这样,每产生一个旋涡,铂丝电阻就变小一次,故测定铂丝电阻变化的频率就测定了旋涡频率,也就测得了流量。除上述在管道内检测旋涡的方法之外,也可用超声波等方法在管壁外进行测量。例如,在图 1-33 中,可在有旋涡的管道上下管壁外安装超声波发射和接收装置,使由一侧发射的超声波束穿透流体,到达另一侧的接收器。工作时,超声波发射器发出幅度恒定的超声波。如果超声波经过的途径上没有旋涡,那么接收器收到的超声波强度也是恒定的;但若有旋涡进入超声波束行进的途径,超声波波束就会被旋涡散射而使接收到的强度减弱,由此接收到的超声波强弱变化,可测知旋涡的频率。

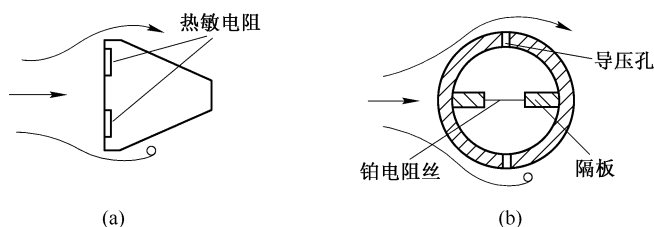


图 1-34 检测旋涡的方法

由于旋涡流量测量方法的实质是测量流速,所以要求管道内流体的流速分布均匀,一般希望在旋涡发生体上游有管道直径 10 倍、下游有 5 倍长度的直管段。

1.4 液位检测仪表

液位的高低在生产中也是一个重要的参数,例如,蒸汽锅炉运行时,必须保证汽包水位有一定的高度。化工反应塔内,常需保持一定的液位以取得较高的生产率。此外,生产中常需测量油罐等容器内的液面高度以计算产品产量和原料消耗,作为经济核算的依据。

1.4.1 浮力式液位计和静压式液位计

浮力式液位计是应用最早的一类液位测量仪表,由于结构简单,价格便宜,至今仍有广泛的应用。这类仪表在工作中可分为两种情况:一种是测量过程中浮力维持不变的,如浮标、浮球等液面计,工作时,浮标漂浮在液面上随液位高低变化,通过杠杆或钢丝绳等将浮标位移传递出来,再经电位器,数码盘等转换为模拟或数字信号;另一种是浮力变化的,根据浮筒在液体内部浸没的程度不同、所受的浮力不同来测定液位的高低。图 1-35 表示的是一种常用的变浮力液面计,可用来测量密封压力容器内的液位。

图 1-35 中,浮筒是一个上下截面相同的金属圆筒,其重量比浮力大(因而这种浮筒常称为沉筒)。当容器中没有液体时,浮筒的质量完全由弹簧力平衡;在容器中有液体时,浮筒的一部分被液体浸没,液体的浮力使弹簧的负担减轻,浮筒向上移动。此移动的距离与液面高度成正比,浮筒通过连杆移动铁心,使差动变压器输出相应的电信号,供指示或远传。

利用液体静压测量液位也是一种常见的方法。在敞口容器中,储液底部压力与容器内的液面高度成正比,故可用压力测量仪表在底部测量压力,来间接测定液位高低,使用前面讨论的压力变送器将液位转换为电信号。当压力变送器与容器底面不在同一水平面上时,可使用变送器内的零点迁移装置,减去一段相应的液位。

在带有压力的密封容器内,由于底部压力不仅与液面高度有关,还与液体表面上的气压有关,这时可用测量差压的方法,消除液面上压力的影响。如图 1-36 所示,将差压变送器的正压室与容器底部相连,负压室与液面上的空间连通。从原理上说,这时差压变送器的输出只反映下部取压点以上液体的静压,可准确地反映出液位的高低。但实际使用中,要考虑上部取压管中必然有气体冷凝,出现附加液柱高度的问题,为了稳定此附加液柱高度,常在上部取压管路中加冷凝罐。这时需在差压变送器中,用迁移装置平衡这一固定的压力。

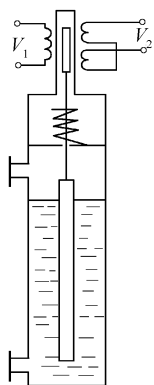


图 1-35 变浮力液面计

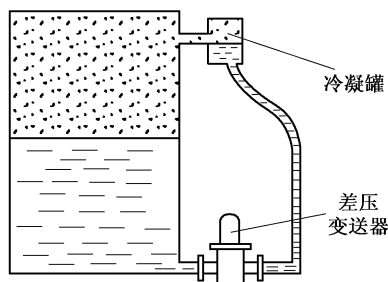


图 1-36 用差压变送器测液位

在测量有腐蚀性或黏度大、含有颗粒、易凝固等液体的液位时,为了避免引压管被腐蚀和

堵塞,专门生产了“法兰”式差压变送器。它直接靠在容器壁上,通过隔离膜片来感受容器内的压力,然后以硅油作传递介质,经细管与变送器的测量室相通。采用硅油传递的好处是它的体膨胀系数小,凝固点低(—40℃以下),适用于寒冷天气及户外安装条件,不会因天冷冻结;常温下流动性好,无腐蚀性,性能稳定。

由于差压法测液位使用的仪表与压力、流量测量仪表通用,结构简单,安装方便,使用相当普遍。

需要注意,浮力和静压式液位计的读数和被测液体的密度有关,当密度发生变化时,必须对标尺进行修正。

1.4.2 电容式液位计

在电容器的极板间填充不同的介质时,由于介电系数的差别,电容量也会不同。例如,以液体代替空气作为介质时,由于液体的介电系数比空气大得多,电容量将变大。因此,测量电容量的变化可知道液面的高低。

图 1-37 是测量石油等非导电液体液位的电容式传感器结构图。它由金属棒做成的内电极和由金属圆筒做成的外电极两部分组成。外电极上有孔,使被测液体能自由流进内外电极之间的空间。当液位为零时,内外电极间的电容量可根据同心圆筒形电容的计算公式写出:

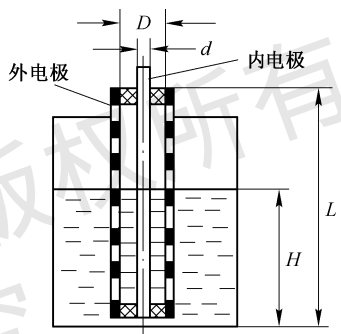


图 1-37 非导电液体的液位测量

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{D}{d}}$$

式中, ϵ_0 为空气的介电系数; L 为圆筒电极的高度; D 和 d 分别为外电极内径及内电极外径。

当液面高度上升到 H 时,电容成为上下两段,计算应分开进行。下半截电容中以液体的介电系数 ϵ 计算,上半截($L-H$)中因介质是空气,其介电系数仍为 ϵ_0 ,故电容量

$$C = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 (L-H)}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{D}{d}}$$

由上式可知,电容量与液面高度 H 成线性关系,测定此电容值便可测知液面高度。这里,测量灵敏度与 $(\epsilon - \epsilon_0)$ 成正比,与 $\ln(D/d)$ 成反比。也就是说,被测液体与空气的介电系数相差愈大,测量灵敏度愈高;同时内外电极间的距离愈靠近,即 D/d 愈接近于 1,测量灵敏度也愈高。当然,决定内外电极间的距离时还要考虑其他因素,如黏滞液体对表面的黏附等,不能过分靠近。

如果被测液体是导电的,那么电极的构造就更简单。如图 1-38 所示,可用铜或不锈钢棒料,外面套上塑料管或搪瓷绝缘层,插在容器内,就成为内电极。若容器是金属制成的,那么外壳就可作为外电极。

当容器中没有液体时,内外电极之间的介质是空气和棒上的绝缘层,电容量很小。当导电的液体上升到高度 H 时,其充液部分由于液体的导电作用,相当于将外电极由容器壁移近到内电极的绝缘层上,电容量大大增加。很容易理解,此时电容量的大小与液面高度成线性关系。

上述液位电容可用交流电桥测量,也可用其他方法(如测量充、放电电流等)测定。使用充、放电法时,用振荡器给液位电容 C_x 加上幅度和频率恒定的矩形波,如图 1-39 所示。若矩形波的周期 T 远大于充放电回路的时间常数,则每个周期都有电荷 $Q=C_x \Delta E$ 对 C_x 充电及放电,用二极管将充电或放电电流检波,可得到平均电流

$$I = \frac{C_x \Delta E}{T} = C_x \Delta E f$$

式中, ΔE 为矩形波电压幅度; f 为矩形波频率;使用中都是保持不变的常数。

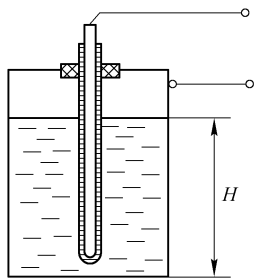


图 1-38 导电液体的液位测量

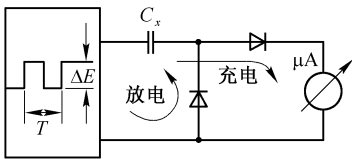


图 1-39 充、放电法测电容

这样,充电(或放电)的平均电流与液位电容成正比,故图 1-39 中微安表的读数可反映液面的高低。

使用电容式液位计时,对黏稠的液体应注意其在电极上的黏附,以免影响仪表精度,甚至使仪表不能正常工作;在测量非导电液体的液位时,应考虑液体的介电系数随温度、杂质及成分的变化而产生的测量误差。

1.4.3 超声波液位计

利用超声波在液体中传播有较好的方向性,且传播过程中能量损失较少,遇到分界面时能反射的特性,可用回声测距的原理,测定超声波从发射到液面反射回来的时间,以确定液面的高度。

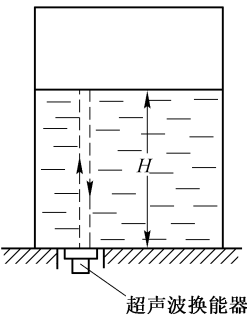


图 1-40 超声波液位计的工作原理图

图 1-40 是超声波液位计的工作原理图。由锆钛酸铅或钛酸钡等压电陶瓷材料做成的换能器安装于容器底壁外侧,若通过一定的电路,给换能器加一个时间极短电压脉冲,换能器便将电脉冲转变为超音频的机械振动,以超声波的形式穿过容器底壁进入液体,向上传播到液体表面被反射后,向下返回换能器。由于换能器的作用是可逆的,在反射波回来时可以起到接收器的作用,将机械振动重新转换为电振荡。用计时电路测定超声波在液体中来回走过的时间 t ,则液面高度

$$H = \frac{1}{2} vt$$

式中, v 为超声波在液体中的传播速度。显然只要知道速度 v ,便可由时间 t 直接算出液面高度 H 。

这种测量方法的优点是检测元件可以不与被测液体接触,因而特别适合于强腐蚀性、高压、有毒、高黏度液体的测量。由于没有机械可动部件,使用寿命很长。但被测液体中不能有

气泡和悬浮物，液面不能有很大的波浪，否则反射的超声波将很混乱，产生误差。此外，换能器怕热，亦不宜用于高温液位的测量。

这种仪表的测量精度主要受声速 v 变化的影响。我们知道，常温下空气中的声速在温度每升高 1°C 时增加 0.18% ；在水中，温度每变化 1°C ，声速变化 0.3% 。所以要用超声波精确测量液位时，必须采取措施消除声速变化的影响。

除了上述几种液位计外，工业上还使用放射性液位计、激光液位计等。

1.5 成分分析仪表

在很多生产过程中，特别是化学反应过程中，仅仅根据温度、压力、流量等物理参数进行自动控制是不够的。例如在合成氨生产中，仅仅控制合成塔的温度、压力、流量并不能保证最高的合成效率，必须同时分析进气的化学成分，控制其中的氢气与氮气的最佳比例，才能获得较高的生产率。又如在锅炉燃烧控制中，固定不变地控制燃料与助燃空气的比例，也不能得到最好的燃烧效果。由于燃料成分的变化，常常不是助燃空气太少，燃烧不充分而浪费燃料，便是助燃空气过多，白白地带走许多热量。因此必须不断分析烟道气的化学成分，据以改变助燃空气的供给量，使炉子获得最高的热效率。

成分分析仪表不仅对保证生产的高质量、高效率是必要的，也是保证人民健康和生产安全所必需的。例如，在化工厂中，当某些气体成分在空气中的比例高到某一限度时，便会危害工人的身体健康或引起爆炸，必须使用分析仪表对这些成分进行连续的监视。

分析仪表种类之多是任何其他仪表所无法比拟的，这是由被分析物料的千差万别与分析的物理或化学原理的多样性决定的。下面只对几种最基本的，也是目前最常用的分析仪表作一扼要的讨论。

1.5.1 热导式气体分析仪

热导式气体分析仪是一种物理式的气体分析仪。根据不同种类气体具有不同的热传导能力这一特性，通过测定混合气体的导热系数，推算出其中某些组分的含量。由于这种分析仪简单可靠，能分析的气体种类较多，因而是一种基本的分析仪器。

关于热传导能力的差异，我们对固体物质是有体会的。谁都知道，铜的导热能力比铁强，而铁又比木材强。在气体中也有类似情况，不同的气体具有不同的导热能力。在热力学中，这种热传导能力的强弱用“导热系数”来表示。经实验测定，气体中氢和氦的导热能力最强，其导热系数约为空气的 7 倍；有些气体的导热能力比空气差，如二氧化碳气体的导热系数只有空气的 60% 左右。气体的导热系数还与气体的温度有关，下面用表1-2列出在 0°C 时，以空气的导热系数为基准的一些气体的相对导热系数。

表 1-2 各种气体在 0°C 时的相对导热系数

气体种类	空气	氮 (N_2)	氧 (O_2)	一氧化碳 (CO)	二氧化碳 (CO_2)	氢 (H_2)	氦 (He)	二氧化硫 (SO_2)	氨 (NH_3)	甲烷 (CH_4)	乙烷 (C_2H_6)	硫化氢 (H_2S)
相对导热系数 λ_i	1.000	0.996	1.013	0.960	0.605	7.150	7.150	0.350	0.890	1.296	0.776	0.524

实验表明，将几种彼此之间无相互作用的气体混合在一起时，混合气体的导热系数近似等

于各组分导热系数的数学平均值,即

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i$$

式中, λ 为混合气体的导热系数; c_i 为第 i 种组分的百分含量; λ_i 为第 i 种组分的导热系数。

如果混合气体仅由两种导热系数已知的组分所构成,那么

$$\lambda = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 (1 - c_1) = \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2) c_1 \quad (1-17)$$

即混合气体的导热系数与其两种组分的百分含量有单值关系。测定混合气体的导热系数便可推知其组分的含量。

热导式气体分析仪就是根据上述原理工作的。实际上,混合气体不限于只由两种组分构成。只要除待测组分外,其余各种组分的导热系数十分接近,便可把它们近似当作两种气体对待。为了保证分析的灵敏度,要求待测组分的导热系数必须与其余组分有显著的差别,差别愈大,分析的灵敏度愈高。

当混合气体中含有多种导热系数相差悬殊的组分时,只要采用一定的预处理装置,用化学或物理方法先除去“干扰”组分,仍然可以使用热导式分析仪。例如,在分析锅炉烟道气的 CO_2 含量时,由于烟气中除 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 CO 外,还含有导热系数特别大的 H_2 和导热系数特别小的 SO_2 ,它们的少量存在都会给分析结果带来很大的误差。为此,样气在进入分析器之前,必须先通过硫化物过滤器,用化学方法先除去 SO_2 ,再经氢燃烧室,把氢烧掉,这样进入热导分析仪的混合气中,除 CO_2 外,其余组分的导热系数都很接近,便可按式(1-17)的关系进行分析。

在实际的热导分析仪中,由于直接测量气体导热系数比较困难,总是把气体导热系数的变化,转换为电阻的变化,然后用平衡电桥或不平衡电桥来测定。图 1-41 表示这种转换器(工业上叫做热导池)的构造,作为热敏元件的铂或钨的细电阻丝被置于金属测量室内,电阻丝上通以恒值电流,使其发热,被测的混合气从中间进气管道通过,有一小部分经过节流孔进入测量室,因电阻丝的温度高于混合气和室壁的温度,电阻丝上的热量就经混合气向室壁传递,若室壁温度是恒定的(一般都有恒温装置),那么电阻丝的热平衡温度就由气体的导热系数决定。例如,混合气的导热系数大时,电阻丝的散热条件好,热平衡温度就低,其电阻值就比较小。这样,电阻丝阻值的大小反映了混合气的导热系数,也就反映了其组成成分的变化。

为了突出气体的热传导在电阻丝散热过程中所起的作用,在热导池的构造及使用上采取如下措施:

① 使电阻丝的温度不超过 150°C ,这样,以辐射方式散失的热量可忽略不计。

② 测量室的直径做得很小,一般为 $4\sim 7\text{mm}$,电阻丝与测量室的壁贴得很近,电阻丝上的热量主要以传导的方式通过被测气体向室壁传递。由于气体从测量室的下端进入,上端流出,与热对流的方向一致,可大大减小对流传热的影响。

③ 电阻丝的长度比它的直径大 2000 倍以上,因此,从电阻丝两端由传导带走的热量很小。

④ 控制进入分析器的气体温度在规定的范围以内,并使气体的流量很小,以减少由气体直接带入或带出的热量。由于采取以上措施,电阻丝的散热状况主要决定于气体的导热系数,使电阻丝的平衡温度能较好地反映气体组成成分的变化。

为了消除测量室内壁温度变化对测量结果带来的误差,热导分析仪中都使用称为参比室的装置,如图 1-41 右半部分所示。参比室的构造与测量室完全相同,只是不通被测气体,而封入一定的参考气体。参比室和测量室安装在同一铜块上,利用铜的良好导热性,保证测量室与参

比室室壁温度的一致。这样,将测量室与参比室的电阻丝接成桥式输出电路时,室壁温度变化的影响可以得到补偿。

图 1-42 是热导分析仪的测量电桥, R_1 、 R_3 是测量室内的电阻, R_2 、 R_4 为参比室内的电阻,桥路由稳定的电源供电。理论分析表明,热导池的灵敏度与加热电流的三次方成正比,在使用中必须精确保持加热电流恒定。桥路输出的不平衡电压 V_0 是待测组分的函数,其读数可用含量已知的标准样气标定。

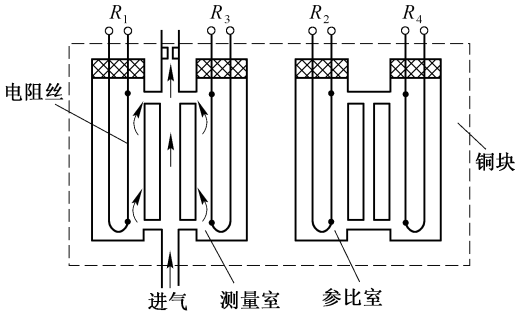


图 1-41 热导池的构造

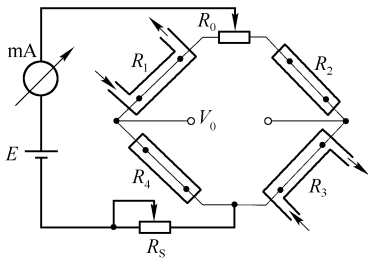


图 1-42 热导分析仪的测量电桥

热导分析仪的应用范围很广,除常用来分析 H_2 、 NH_3 、 CO_2 、 SO_2 等气体的含量外,还用作色谱分析仪中的检测器以分析其他成分。由于热导分析仪能连续分析气体成分,可以组成连续指示、记录及成分自动调节系统。

1.5.2 红外线气体分析仪

红外线气体分析仪也是一种物理式分析仪表,它是根据不同的组分对不同波长的红外线具有选择性吸收的特征工作的。由于其使用范围宽,不仅可以分析气体,也可分析溶液,且灵敏度较高,反应迅速,能连续指示和组成自动调节系统,有广泛的应用。

红外线是指波长为 $0.76\sim300\mu m$ 的不可见光波,在工业红外线分析仪中,使用的红外线波长一般在 $1\sim25\mu m$ 之间。实验证明,除氮、氖、氩等单原子惰性气体及氢、氧、氮、氯等具有对称结构的双原子气体外,大部分多原子气体,如 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 NH_3 、 C_2H_5OH 、 C_2H_4 、 C_3H_6 、 C_2H_6 、 C_3H_8 及水气等,对上述波长范围的红外线都有强烈的选择性吸收的特性,例如在图 1-43 中, CO 对波长为 $4.5\sim5\mu m$ 的红外线具有强烈的吸收作用,但对其他波长的红外线却不吸收。这种现象可从量子学说得到解释,因为分子具有不连续的能量状态,即只能处于不同的能级中,低能级的分子只能吸收固定的能量,才可跳到高能级去,中间状态是不存在的。同时量子学说又认为,光的传播是以一份一份集中的能量,即以光子的方式进行的,每个光子的能量为

$$E=h\nu$$

式中, h 为普朗克常数, $h=6.626\times10^{-34} J\cdot s$; ν 为光的频率。

当红外线所具有的能量正好等于分子的两个能级之差时,气体分子就很容易将此红外光子吸收。由于各种分子具有不同的能级,因此选择吸收的光频率也各不相同。工业上常根据这一原理,从吸收峰的位置分布,检知某一组分是否存在。

关于光的强度,实践证明,当光通过吸收介质时,其强度随介质的浓度和厚度按指数规律衰减,即

$$I = I_0 e^{-\mu c l} \tag{1-18}$$

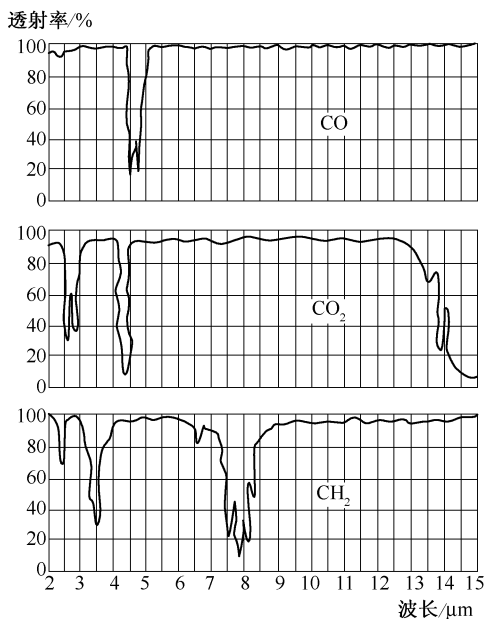


图 1-43 红外吸收谱

式中, I_0 为射入时的光强; I 为透出时的光强; l 为介质的厚度; c 为吸收介质的浓度; μ 为吸收系数。

上述关系称为朗伯-贝尔定律。必须指出, 不仅不同物质的吸收系数 μ 各不相同, 对同一物质, μ 亦随光的波长而变化, 例如对不吸收的光, $\mu=0$, 故上述表达式只适用于单色光。

如果吸收层厚度很薄或浓度很低, 即 $\mu cl \ll 1$, 则式(1-18)可近似写成

$$I = I_0(1 - \mu cl) \quad (1-19)$$

即对厚度一定的吸收层, 其吸收衰减率与浓度成线性关系。

这样, 当需要分析混合气中某一组分的含量时, 可用强度恒定的红外线照射厚度确定的混合气体薄层; 由于各种组分吸收的红外线波长是确定的, 故可测量透射出来的该波长的红外线强度。从光强被吸收的程度, 推知该组分在混合气中的浓度。红外线气体分析仪就是根据这一原理构成的。

图 1-44 是工业上常用的红外线气体分析仪原理图。由红外光源产生的红外线, 经反光镜形成两束平行光线。为了使检测放大系统能工作于交流状态, 避免直流放大器的零点漂移, 用切光片对这两束红外线进行调制。切光片是对称开孔的圆片, 由同步电动机带动, 将红外线一时阻断, 一时导通, 调制成几赫兹的矩形波。经调制后的两束红外线分别进入测量气室和参比气室。测量气室有进口和出口, 可连续通过被测混合气体。参比气室内密封着根据被测气体选定的 N_2 、Ar 或其他气体。当测量气室中无待测组分时, 调整两束光的强度, 使其达到上下接收室的光强相等, 此时接收器无输出。

图 1-44 中的接收器是目前使用最多的薄膜电容式接收器, 它有两个接收气室, 分别接收由测量气室和参比气室透出的红外线。接收气室内封有浓度较大的待测组分气体, 在吸收波长范围内, 它能将射入的红外线辐射能全部吸收, 变为接收气室内的温度变化。由于气室的容积是固定的, 根据气态方程, 温度的变化会立即表现为压力的变化。当测量气室内通入待测气体时, 由于部分光被吸收掉, 从测量气室透出的光强比参比气室透出的弱, 于是两个接收气室间出现压力差。它推动分隔两室的金属薄膜(常为厚度 $5 \sim 10 \mu m$ 的铝箔), 改变与另一固定极

板间的距离,即改变薄膜与固定极板间的电容量。待测组分的浓度愈大,电容量的变化也愈大。前面已说过,这里使用的红外线是受过调制的脉动光线,因此其电容量的变化也是脉动的。确切地说,待测组分浓度愈大,电容量的脉动幅度也愈大。测定此电容量的变化幅度,便可指示出样气中待测组分的浓度。

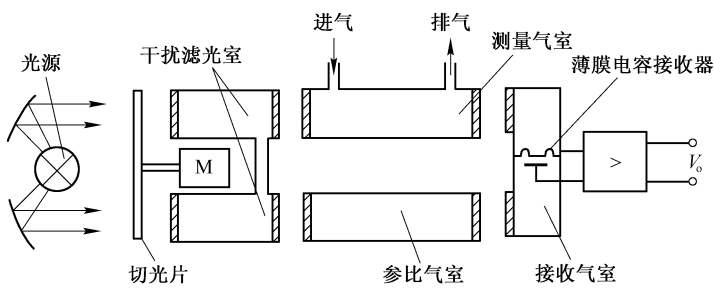


图 1-44 红外线气体分析仪原理图

从原理上说,测定这个电容量的变化是不难的,例如,可在电容上加一定的直流电压,随着电容量的脉动变化,电容将反复地充电和放电,每次充、放电电流的大小决定于电容量的变化幅度,可使该电流流过一个阻值很大的电阻,转换为电压信号输出。需要注意的是,薄膜电容器的电容量很小,一般只有 50pF 左右,调制频率又低,故此信号源内阻很大,必须使用高输入阻抗的放大器。实际的红外线分析仪中,常用场效应管组成的源极跟随器作为前置放大级。为减少电磁干扰,前置放大级常紧靠着接收气室安装。

当混合气中含有与被测组分有重叠吸收峰的其他干扰气体时,由于那些气体的浓度变化也会改变测量气室内红外线的吸收状况,影响接收器的输出,造成分析误差。为此,图 1-44 中设有干扰滤光室,里面填充浓的干扰气体,使干扰气体可能吸收的辐射能在这里全部吸收掉。这样,测量室内干扰组分浓度的变化就不会影响分析结果。如果混合气中不存在干扰气体,就不需要安装干扰滤光室。

和红外线分析仪原理相似的,还有紫外线分析仪、比色分析仪等,在工业上也有广泛的应用。

1.5.3 色谱分析仪

色谱分析法是一种分离分析技术,其特点是分离能力强,分析灵敏度高,分析速度快和样品用量少。例如,用于分析石油产品时,一次可分离分析一百多种组分;在分析超纯气体时,可鉴定出含有 1ppm(ppm 表示百万分之一),甚至 0.1ppb(ppb 表示十亿分之一)的组分。因此,目前被广泛应用于石油、化工、电力、医药、食品等生产及科研中。

这种分析法得名于 1906 年,当时有人把溶有植物色素的石油醚倒入一根装有碳酸钙吸附剂的竖直玻璃管中,然后再倒入纯的石油醚帮助它自由流下,由于碳酸钙对不同的植物色素吸附能力不同,吸附能力弱的色素较快地通过吸附剂,而吸附能力强的色素则受到较长时间的滞留,前进较慢。这样,不同的色素在行进过程中就被分离开,在玻璃管外可以看到被分离开的一层层不同颜色的谱带。这种分离分析方法被称为色层分析法或色谱分析法。

随着检测技术的发展,这种方法被扩展到无色物质的分离,分离后各组分的检测也不再限于用肉眼观察颜色,所以“色谱”这个名字渐渐失去了它原来的含义。但因为将各组分分离的方法仍是利用原来的原理,所以至今仍使用这个名称。

在上面讨论的植物色素分离的例子中,色谱柱中的碳酸钙作为吸附剂是固定不动的,称为

固定相,被分析的石油醚自上而下流过吸附剂,称为移动相。在色谱分析法中,凡移动相是液态的称为液相色谱,移动相是气态的称为气相色谱。由于物质在气态中传递速度快,样气中各组分与固定相作用次数多,所以气相色谱分离效能高、速度快;加之气相检测器的灵敏度高,使气相色谱获得了最广泛的应用。下面扼要介绍气相色谱分析仪的工作原理和组成部分。

一台气相色谱分析仪的核心部分为下面几部分。

(1) 色谱柱

色谱分析的首要问题是把混合物中的不同组分分离开,然后才能用检测器分别对它们进行测量。这个分离的任务是由色谱柱完成的,因此它是色谱分析仪工作的基础,其效应对整台仪表的指标有重大的影响。

气相色谱仪使用的色谱柱种类很多,这里只介绍一种最基本的气固填充柱,它是在直径为3~6mm、长为1~4m的玻璃或金属细管中,填装一定的固体吸附剂颗粒构成的。目前常用的固体吸附剂有氧化铝、硅胶、活性炭、分子筛等。当被分析的样气脉冲在称为“载气”的运载气体的携带下,按一定的方向通过吸附剂时,样气中各组分便与吸附剂进行反复的吸附和脱附过程,吸附作用强的组分前进很慢,而吸附作用弱的组分则很快地通过。这样,各组分由于前进速度不同而被分开,时间上先后不同地流出色谱柱,逐个进入检测器接受定量测量。

色谱柱的尺寸及其填充材料的选择决定于分析对象的要求,不同的材料具有不同的吸附特性。即使是同一种吸附剂,当温度、压力、载气种类以及加工处理方法不同时,也会得到不同的分离效果。

(2) 检测器

检测器的作用是将由色谱柱分离开的各组分进行定量的测定。由于样品的各组分是在载气的携带下进入检测器的,从原理上说,各组分与载气的任何物理或化学性质的差别都可作为检测的依据。目前气相色谱仪中使用最多的是热导式检测器和氢火焰电离检测器。由于热导检测器的原理在前面热导式气体分析仪中已作介绍,这里不再重复,其检测极限约为百万分之几的样品浓度,是使用较广的一种检测器。

氢火焰电离检测器的灵敏度可比热导检测器高1000倍,是一种常用的高灵敏度检测器。它只能检测有机碳氢化合物等在火焰中可电离的组分。不管是何种碳氢化合物,一定量的碳含量所得到的检测器输出信号是恒定的,检测极限对碳原子几乎可达十亿分之一的数量级。

氢火焰电离室的构造如图1-45所示。带样品的载气从色谱柱出来后,与纯氢混合进入火焰电离室(如果用氢作载气就不需要另外加氢),由点火热电阻丝将氢点燃,在洁净空气的助燃下形成氢火焰,样品中的有机组分在火焰中被电离成离子和电子,在附近电极的电场作用下,形成离子电流。由于氢火焰的离子化效率很低,这电流是很小的,在没有样品时约为 10^{-12} A的数量级,在最大信号时也只有 10^{-7} A左右。此电流大小还与电极上所加的电压高低有关,电压太低,产生的离子不能被电极完全收集。当电压增至一定数值时,离子被完全收集,输出电流在一定的范围内与所加电压大小无关,成为只由样品组分决定的恒流源,检测器正常工作应在这个区域内。如果电极上所加电压太高,会产生气体放电,使电流剧增,也是不允许的。

图1-46是氢火焰电离检测器用的离子电流放大器的原理图。在电离室的收集极和极化电极间加有直流电压,当电极间出现离子时,就形成电流,经高阻值电阻 R_1 变为电压,由高输入阻抗放大器放大后输出。为保证高输入阻抗,这种放大器的前置级使用静电电子管或场效应晶体管组成。

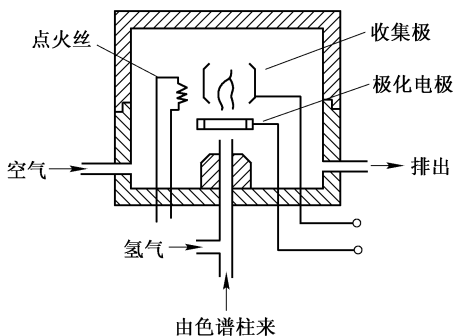


图 1-45 氢火焰电离室示意图

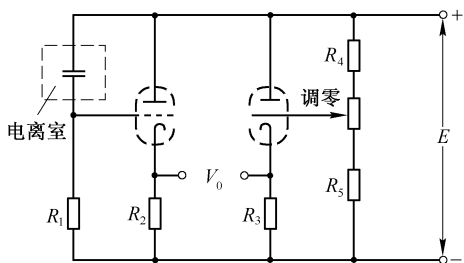


图 1-46 离子电流放大器原理图

(3) 载气及进样装置

从色谱柱的分离原理可知,被分析的样气不应该连续输入,而只能是时间上很集中的定量输入。进一次样气,分析一次。进样时间应比较短暂,以保证各组分从色谱柱流出时,在时间上也比较集中。由于样气的进入是脉冲式的,就必须使用连续通入的“载气”来运送,才能通过色谱柱。载气应是和样气不起化学作用,且不被固定相所吸附的气体,常用的有氢、氮、空气等。载气的选择还和检测器的类型有关,如果用热导式检测器,则常用氮作载气,因其导热系数与绝大多数气体有较大的差异,可获得较高的检测灵敏度。

上述各部分配合工作的情况可表示如图 1-47,图中画出了混合气体在色谱分析仪中进行的一次完整的分离分析过程。可以看出,样气中有 A、B、C 三种不同的成分,经色谱柱分离后,依次进入检测器。检测器输出随时间变化的曲线称为色谱流出曲线或色谱图,这里,色谱图上三个峰的面积(或高度)分别代表相应组分在样品中的浓度大小。

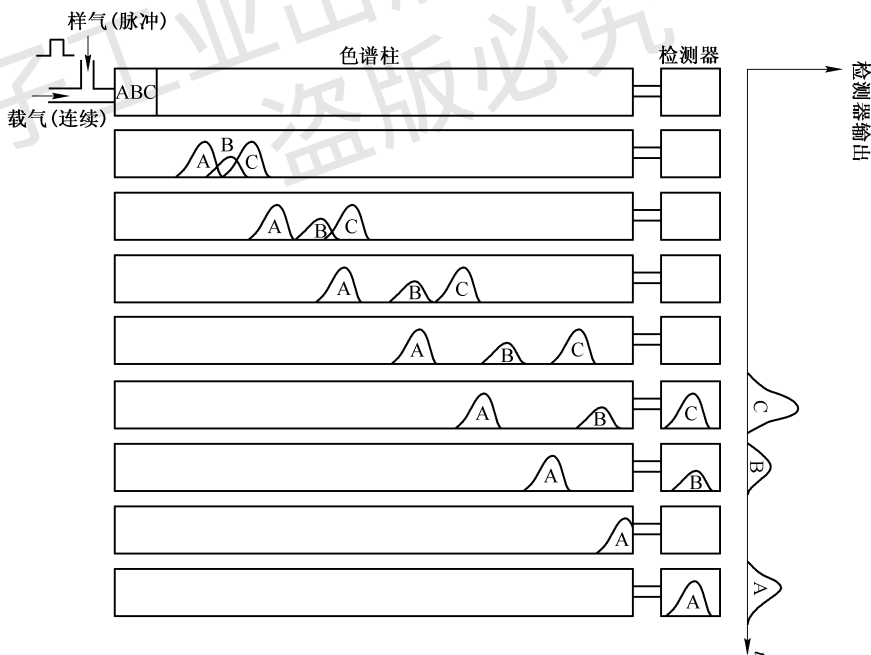


图 1-47 混合气体在色谱分析仪中的分离分析过程

图 1-48 是一个工业气相色谱仪的简化原理图。与实验室用的色谱分析仪不同的是,工业色谱仪有一套程序控制装置,按一定的周期,自动切换气路,定量进样,完成一个又一个分析循环。

图 1-48 画出了组成一台完整的色谱分析仪所必要的组成部分。由高压气瓶供给的载气，经减压、稳流装置后(有时还需净化干燥)，以恒定的压力和流量，通过热导检测器左侧的参比室，进入六通切换阀。该阀订有“取样”和“分析”两种工作位置，是受定时装置控制的。当阀处于“取样”位置时，阀内的虚线联系被切断，气路按实线接通。这样，载气与样气分为两路，一路是样气经预处理装置(包括净化、干燥及除去对色谱柱吸附剂有害成分的装置等)，连续通过取样管，使取样管中充满样气，随时准备被取出分析；另一路是载气直接通过色谱柱，对色谱柱进行清洗后，经热导池右侧的测量室放空，这时检测器输出零信号。这种状况经过一定的时间后，定时控制器动作，把六通切换阀转到“分析”位置，于是阀门内实线表示的气路切断，虚线气路导通。载气推动留在定量取样管中的样气进入色谱柱，经分离后，各组分在载气的携带下先后通过检测器的测量室。检测器根据测量室与参比室中气体导热系数的差别，产生输出信号，可供仪表记录或指示，也可以通过计算色谱峰面积或读取峰高的装置，对某些组分建立采样式的自动调节系统。

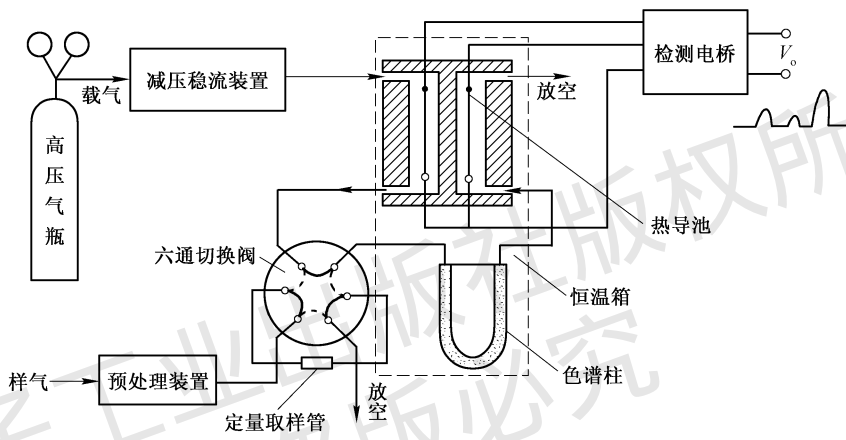


图 1-48 工业气相色谱仪的原理图

色谱分析方法不仅可以做定量分析，还可以用来做定性分析。实验证明，在一定的固定相及其操作条件下，各种物质在色谱图上的出峰时间都有确定的比例，因此在色谱图上确知某一组分的色谱峰后，可根据资料，推知另一些峰所代表的是何种物质。如果组分比较复杂而不易推测时，可用纯物质加入样品，或从样品中先去掉某物质的办法，观察色谱图上待定的峰高是否增加或降低，以确定未知组分。对色谱图上各峰定量标定的最直接的方法是配制已知浓度的标准样品进行实验，测出各组分色谱峰的面积或高度，得出单位色谱峰面积或峰高所对应的组分含量。

1.5.4 氧化锆氧分析仪

近年来随着能源价格上涨和人们对生态环境的普遍重视，节能减排、保护环境已成为我国实现可持续发展的一项基本国策。在火力发电厂和工业锅炉的运行中，实现空气/燃料比的优化控制是节能减排的关键技术。在燃烧过程中，如果助燃空气不足，燃料不能充分燃烧，不仅浪费能源，冒黑烟还污染环境。但如果空气/燃料比太大，过剩的空气不仅降低炉膛温度，影响热效率，在高温下的过氧燃烧还会产生 NO、NO₂ 等有害气体，造成酸雨。因此，检测烟气中的剩余含氧率是实现优化燃烧，提高能源利用率，保护生态环境的重要手段。

在各种氧分析仪中,目前应用最为广泛的是氧化锆氧分析仪。这是一种利用氧化锆固体电解质特性制成的氧浓差电池传感器,其基本工作原理如图 1-49 所示。在一片氧化锆固体电解质的两个表面分别烧结一层多孔的铂电极,并将其置于 800℃ 以上的高温中,当上、下两侧气体中氧浓度不同时,在两极间就会出现电动势 E ,称为氧浓度差电动势。利用此电动势与两侧气体中的氧浓度差的单值关系,便可制成氧浓度分析仪。

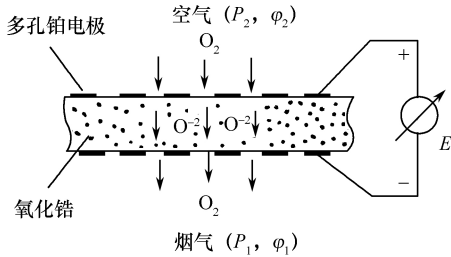


图 1-49 氧浓差电池传感器的基本工作原理

在常温下,纯净的氧化锆(ZrO)是浅灰色不导电的单斜晶体。若在其中掺入少量氧化钙(CaO)或氧化钇(Y_2O_3),并加热到 1150℃~1200℃焙烧后,可变成稳定的立方晶体。这时,一部分四价的锆被二价的钙或三价的钇置换,形成氧离子的空穴。当温度在 800℃ 以上时,空穴型的氧化锆就成为良好的氧离子导体,也就是说,掺杂后的氧化锆可以成为固体电解质。

在图 1-49 中,如果在氧化锆的下侧接烟气,其氧分压为 P_1 ,氧浓度为 φ_1 ;氧化锆的上侧接空气,其氧分压为 P_2 ,氧浓度为 φ_2 。一般烟气中的氧含量约为 3%~7%,而空气中的氧含量一般为 20.8%,显然 $\varphi_2 > \varphi_1$, $P_2 > P_1$ 。当温度达到 800℃ 以上时,空穴型氧化锆就成为良好的氧离子导体,氧气能以离子的形式从浓度高的一侧向浓度低的一侧扩散。

在氧分压高的一侧,氧分子从铂电极得到电子,成为氧离子进入氧化锆,在氧分压的推动下,氧离子通过氧化锆到达低氧一侧时,将电子还给铂电极,变成氧分子进入烟气。在上述迁移过程中,高氧侧的铂电极因失去电子而带正电,低氧侧的铂电极因得到电子而带负电。只要两侧有氧分压差异,氧离子的迁移就会持续进行,形成氧浓差电动势。根据 Nernst 方程,氧浓差电动势 E 可表示为

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_2}{P_1} \tag{1-20}$$

式中, R 为气体常数, F 为法拉第常数, n 为每个氧分子携带的电子数($n=4$), T 为氧化锆的工作温度(热力学温度), P_1 、 P_2 分别为被测烟气和参比气体的氧分压。

在混合气体中,由于各组分的分压力与总压力之比和它的体积浓度成正比。如果氧化锆两侧的气体总压力 P 相等,则因

$$\frac{P_1}{P} = \varphi_1, \quad \frac{P_2}{P} = \varphi_2$$

氧浓差电动势的表达式可写成

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \tag{1-21}$$

式中, φ_2 为参比气体的氧浓度。对于大气, $\varphi_2=20.8\%$,其余参数 R 、 n 、 F 为常数,如能保持温度 T 为定值, E 就只随被测气体中的氧含量(浓度) φ_1 变化。因此可通过电动势 E 检测烟气中的氧含量。

氧化锆传感器的原理结构如图 1-50 所示。其核心部件是一根一端封闭的氧化锆管,在内、外壁上烧结多孔铂电极。烟气经过滤罩引至氧化锆管外侧,参比气体引至氧化锆管内侧。

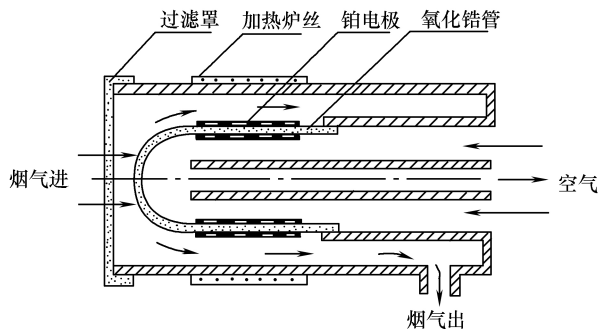


图 1-50 氧化锆传感器的结构示意图

为了稳定传感器的工作温度,在传感器外围绕有加热电炉丝,并用热电偶测量温度,通过温度调节器控制炉丝的加热功率,把氧化锆管的工作温度稳定在一定的数值上(如 850°C)。在铂电极上获得的氧浓差电动势的幅度一般为几十毫伏,它与烟气中的氧浓度 φ_1 呈负相关特性,被分析烟气中氧浓度愈小,输出电动势愈大。

为了保证氧化锆氧分析仪的测量准确,使用中需注意以下问题:

(1)被测气体与参比气体的压力必须相等,否则氧分压的电动势表达式(1-20)不能转换成氧浓差表达式(1-21),测量会产生原理性误差。

(2)由于在氧浓差电池工作过程中,高氧侧的氧分子会以离子方式穿过氧化锆进入低氧侧,使氧化锆两侧的氧浓度趋于接近,因此要保证烟气和参比气都有一定的流速。但也要注意,气体的流速不能过大,以免影响氧化锆管的温度,造成附加误差。

氧化锆氧分析仪由于结构简单,灵敏度高,反应迅速,烟气中其他干扰成分影响小等优点,在燃烧控制中获得了广泛的应用。

复习思考题

- 1-1 试述热电偶的测温原理,工业上常用的测温热电偶有哪几种? 什么叫热电偶的分度号? 在什么情况下要使用补偿导线?
- 1-2 热电阻测温有什么特点? 为什么热电阻要用三线接法?
- 1-3 说明热电偶温度变送器的基本结构、工作原理及实现冷端温度补偿的方法。在什么情况下要作零点迁移?
- 1-4 什么叫共模干扰和差模干扰? 为什么工业现场常会出现很强的共模干扰? 共模干扰为什么会影响自动化仪表的正常工作? 怎样才能抑制其影响?
- 1-5 力平衡式压力变送器是怎样工作的? 为什么它不受弹性元件刚度变化的影响? 在测量差压时,为什么它的静压误差比较大?
- 1-6 试述差动电容式和硅膜片压阻式压力变送器的工作原理,它们与力平衡式压力变送器相比有何优点?
- 1-7 试述节流式、容积式、涡轮式、电磁式、旋涡式流量测量仪表的工作原理、精度范围及使用特点。
- 1-8 简述液位的测量方法。
- 1-9 试述热导分析仪、红外线分析仪、色谱分析仪及氧化锆氧分析仪的工作原理及用途。